



Prefabrik Yapım Sistemleri ile İnşa Edilmiş Yapılarda Enerji Verimliliği Üzerine Bir Araştırma

Ahunur AŞIKOĞLU

Araş. Gör. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye
ahunur.asikoglu@deu.edu.tr
ORCID ID: 0000-0002-7227-1788

ÖZET

Endüstri Devrimiyle birlikte, çağın gereklerine uygun olarak, üretim sistemlerinde endüstrileşme hızla gelişmektedir. Endüstrileşmenin gelişmesine paralel olarak yapı üretim sektöründe makine yoğun üretim artmaktadır. Bina üretiminde daha az insan gücü ile daha hızlı inşa sağlayan endüstrileşmiş yapım yöntemlerinin başlıcalarını prefabrik sistemler oluşturmaktadır. Prefabrik sistemler kullanılan malzemeye göre; ahşap, çelik, beton, yapım sistemine göre; iskelet, panel ve hücre sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Farklı malzemeler ve farklı sistemler aynı üretimde karma olarak kullanılabilir. Doğal afetler, savaşlar, göç, hızlı nüfus artışı gibi nedenlerle hızlı üretime ihtiyaç duyulduğunda, prefabrik sistemler sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde; prefabrik sistemler sadece hızlı bina üretimi sağladıkları için değil, aynı zamanda binaların enerji verimliliğine katkı sağlayabildikleri için de tercih edilmektedir. Çalışmada; prefabrik sistemler kullanılarak inşa edilmiş, enerjiyi etkin ve verimli kullanan, düşük enerjili binalar incelenmiştir. İncelenen yapıların tamamı yüksek yalıtımlı yapı kabuğuna sahiptir. Özellikle prefabrik panellerin, düşük enerjili bina üretmek amacıyla oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. İncelenen yapıların duvarlarında ve çatısında yalıtım katmanlı prefabrik panellerin kullanımıyla, yapı elemanlarının ısı geçirimsizliği büyük oranda arttırılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Prefabrik yapım, enerji performansı, prefabrik iskelet, prefabrik panel, prefabrik hücre, yalıtım

ABSTRACT

With the Industrial Revolution, industrialisation in production systems has been developing rapidly in accordance with the requirements of the age. In parallel with the development of industrialisation, machine intensive production is increasing in the building production sector. Prefabricated systems are the main ones of industrialised construction methods that provide faster construction with less manpower in building production. Prefabricated systems are classified as wood, steel, concrete according to the material used, frame, panel and module systems according to the construction system. Different materials and different systems can be mixed in the same production. Prefabricated systems are frequently preferred when rapid production is needed due to natural disasters, wars, migration, rapid population growth. Nowadays; prefabricated systems are preferred not only because they provide fast building production, but also because they can contribute to the energy efficiency of buildings. In this study; low energy buildings constructed using prefabricated systems, which use energy effectively and efficiently, are analysed. All of the analysed buildings have a highly insulated building envelope. Especially prefabricated panels are widely used to produce low energy buildings. Since the thermal conductivity level of the building envelope directly affects the energy performance; it was determined that all of the examples constructed using prefabricated systems examined within the scope of the study have very high energy performance and are low energy consuming buildings.

Keywords: Prefabrication, energy performance, prefabric frame, prefabric panel, prefabric module, insulation

1.Giriş

Dünyada teknolojinin ve endüstrinin gelişmesine paralel olarak bina yapım sistemleri de gelişmektedir. Endüstri Devrimi'nin başlamasıyla, emek yoğun üretimden makine yoğun

üretimde doğru yönelim başlamıştır. Endüstri Devrimi'yle birlikte; sanayide makineleşmenin artmasına ve çelik, betonarme gibi yapımda kullanılan malzemelerin keşfine paralel olarak; yapı sektöründe de büyük gelişme yaşanmıştır.

Hızla artan nüfus, kırsaldan kentlere göç, savaşlar, doğal afetler gibi sebeplerle barınma yapılarına ihtiyaç artmıştır. Bu talebe karşılık olarak, yapımda endüstrileşme başlamıştır. Yapımda endüstrileşmeyi gerekli kılan faktörleri; beşeri faktörler, ekonomik faktörler, üretim sistemi faktörleri olarak sıralamak mümkündür. Yapımda endüstrileşme; üretimin sürekliliğinin sağlanması, talep sürekliliğinin olması, standartlaşma, farklı üretim süreçlerinin bütünleştirilmesi ve planlanmış iş organizasyonu ile mümkün olmaktadır. (Türkçü, 1988)

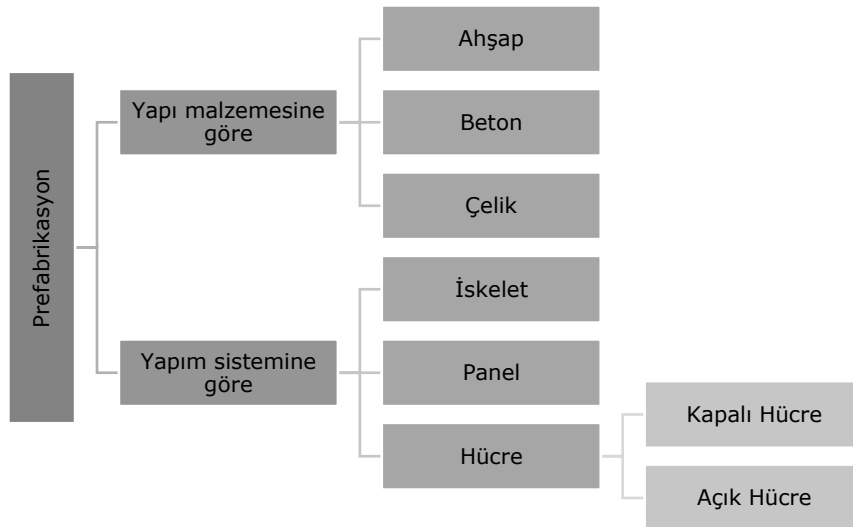
Yapımda endüstrileşmeye paralel olarak ön üretimli prefabrik yapı sistemleri geliştirilmiştir. TDK'ya göre Fransızca kökenli olan Prefabrik; "parçaları önceden hazırlanıp birleştirilerek oluşturulan, kurma" anlamına gelmektedir (URL-1). Prefabrik yapı sistemlerinde; standartlaşma sağlanmış, belirli tolerans aralığında hataya sahip, mevsimsel şartlardan ve şantiye koşullarından bağımsız, fabrikada hammaddeye kadar üretilmiş yapı elemanları kullanılmaktadır. (Seitablaiev ve Umaroğulları, 2020)

Ön üretimli prefabrik sistemler, ilk dönemlerde hızlı çözüm gerektiren ihtiyaçlara yönelik kullanılırken; günümüzde konforlu yaşam biçimi sunan, çevreye duyarlı, sürdürülebilir, ekonomik ve enerji verimliliği yüksek yapılar üretmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada prefabrikasyon ile üretilmiş yapıları enerji verimliliği açısından analiz etmek amacıyla; çeşitli prefabrik elemanların kullanıldığı yapılar; yapı sistemleri, yapı malzemeleri, yapının fiziksel özellikleri gibi yönlerden analiz edilmiş; yapıların enerji verimlilik düzeyleri ortaya konmuştur.

2. Yapımda Prefabrikasyon

Geleneksel yapı sistemleri ile karşılaştırıldığında, prefabrik sistemlerin modern kentleşme için önemi son zamanlarda; enerji tüketimi, küresel beklentiler, yeşil bina üretimi ve yapısal performans gibi sebeplerle artmıştır. (Khan vd., 2023) (Arif vd., 2010) (Srisangeerthan vd., 2018) Prefabrik sistemler emek yoğun geleneksel sistemlere göre hızlı, hatasız, standart üretime uygun, belirli modül koordinasyonunda tasarlanıp üretilmiş, makine yoğun rasyonel sistemlerdir.

Prefabrik sistemler için farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir. En yaygın sınıflandırma biçimleri; yapı sistemine göre veya yapı malzemesine göre sınıflandırmadır. (Arslan, 2023) (Baş ve Vural, 2019)



Şekil 1. Çalışmada kullanılan sınıflandırmanın şematik gösterimi

2.1 Prefabrikasyonda Yapı Malzemesine Göre Sınıflandırma

Yerinde üretimi azaltan, üretimin çoğunlukla fabrikada yapıldığı, şantiyede ise montajının yapıldığı ön üretimli sistemler, kullanılan malzemeye göre sınıflandırılabilir.

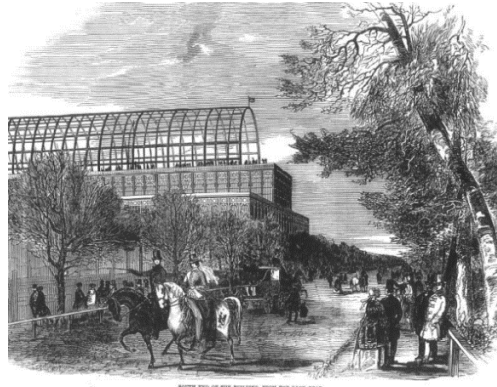
Prefabrikasyonda malzemeye göre sınıflandırma;

-Çelik

-Ahşap

-Betonarme olarak üç ana başlık altında yapılabilmektedir. (Lacey, Chen, Hao ve Kaiming, 2018)

Çelik malzeme 1800 lü yıllarda Sir Henry Bessemer tarafından geliştirilmesiyle birlikte (Guthrie, Roderick ve Mihaiela, 2022), bina endüstrisinde hızla kullanılmaya başlanmıştır. Prefabrik yapımda dökme demirle üretilen ilk yapılardan olan Crystal Palace, 1850'lerde Joseph Paxton tarafından tasarlanmıştır. Paxton, dökme demir ve cam üretim süreçlerindeki son gelişmelerden faydalanarak, tüm parçaların şantiye dışında prefabrike olarak üretilebileceği, daha sonra şantiyede monte edilip kurulabileceği ve sökülebileceği modüler bir tasarım ortaya koymuştur. (Addis, 2006)



Şekil 2. Çelik prefabrikasyonla üretilen Crystal Palace (Addis, 2006)

Hafif yapılar üretilmesine olanak sağladığı için depreme dayanıklı, hızlı montajla üretime uygun, geri dönüştürülebilir bir malzeme olan çelik ile (İrban ve Fenkli, 2022) günümüzde çoğunlukla iskelet sistem prefabrik yapılar üretilmektedir. Çelik malzeme ile geniş açıklıklar geçilebildiği için özellikle endüstri yapılarında prefabrik kullanım açısından sıklıkla tercih edilmektedir.

Ahşap malzemenin ilk prefabrik kullanımı; 1800'lü yıllarda George Washington Snow tarafından yapılmıştır. Snow tarafından geliştirilmiş Balloon Frame olarak adlandırılan konstrüksiyon, tamamı ön boyutlandırılmış elemanlardan oluşan, yerinde monte edilen ahşap karkas sistemdir (Pizzi, 2003) (Türkçü, 2017).



Şekil 3. Balloon Frame sistem kesiti (Türkçü, 2017)

Özellikle kolonileşme döneminde artan konut ihtiyacına; uzmanlık gerektirmeyen birleşim detayları ve her yere uygulanabilirlik imkanıyla çözüm olmuştur. Günümüzdeki ahşap karkas yapıların ve ahşap prefabrik sistemlerin başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir (Şekil 3).

Ahşabın prefabrikasyonda kullanımı; yüksek ısı yalıtımı, işleme kolaylığı, farklı iklim ve bölgelerde uygulanabilirliği açısından büyük paya sahiptir. (Garay, Pfenniger, Castillo ve Fritz, 2021) Günümüzde kolay birleşim detayları açısından prefabrik iskelet sistemlerde ve ısı yalıtımı açısından prefabrik panel sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Prefabrik yapım sistemlerinde beton; farklı ölçeklerdeki yapıların strüktürlerinde ve alt yapı inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme malzemeyle prefabrikasyon 1950'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. (Seitablaiev ve Umaroğulları, 2020) Türkiye'de, özellikle sanayi yapılarında; hızlı üretim süreci, ilk yatırım maliyetinin uygun olması sebebiyle betonarme ön üretilmiş çerçeve sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. (Gönül ve Demirel, 2003) Ancak ülkemizde beton prefabrikasyon ile bina üretimi 1960'lı yıllarda başlamıştır. Konvansiyonel yapım sistemlerine kıyasla; prefabrik beton elemanlar ile bina üretimi; hız, işçilik maliyeti, kalıp giderleri, atık malzemenin azaltılması gibi konularda büyük avantaj sağlamaktadır. (Amani ve Abdul, 2018)

2.2 Prefabrikasyonda Yapım Sistemine Göre Sınıflandırma

Prefabrik yapım sistemleri 3 ana başlık altında incelenmektedir. Prefabrik sistemler strüktürlerine göre; tek boyutlu yapım sistemi olan iskelet sistemler, iki boyutlu yapım sistemi olan panel sistemler, üç boyutlu yapım sistemi olan hücre sistemler olarak ayrılmaktadırlar (Türkçü, 1988). Ancak günümüz uygulamalarında; iskelet ve panel sistemlerin birlikte kullanıldığı hibrit üretimler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin çelik iskelet beton panel ya da ahşap iskelet ahşap panel gibi her iki sistemin de kullanıldığı yapılar inşa edilmektedir.

2.2.1 Prefabrik İskelet Sistemler

Prefabrik iskelet sistemler; önceden üretilmiş kolon ve kirişlerden oluşur. Betonarme, ahşap ve çelik malzemelerin tamamı prefabrik iskelet sistem üretiminde kullanılmaktadır. Geniş açıklık geçilmesi gereken endüstri ya da spor kompleksi yapılarında çelik ya da tutkallı tabakalı ahşap, Maliyet ve üretim hızının öncelik haline geldiği yapılarda ön üretilmiş betonarme elemanlar, az katlı konut yapılarında ahşap, betonarme ve çelik, yüksek yapılarda ise çelik malzeme yaygın olarak tercih edilmektedir.

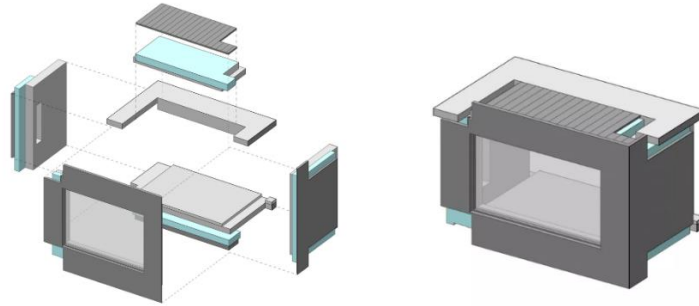
Prefabrik iskelet sistemlerde duvarların çoğunlukla taşıyıcılık özelliği yoktur ancak; rijitliğe katkı sağlamaktadırlar (Eser, 1982). Günümüzde prefabrik iskelet sistemlerin aynı ya da farklı malzemeden üretilmiş panel sistemlerle birlikte kullanıldığı ve yapı inşaatındaki prefabrik eleman oranının arttırıldığı görülmektedir.

2.2.2 Prefabrik Panel Sistemler

Prefabrike paneller; düşeyde duvar elemanları ya da yatayda döşeme elemanları olarak kullanılabilen ön üretilmiş elemanlardır. Düşeyde kullanılan panellerle bölücü ya da taşıyıcı duvarlar inşa edilebilir (Eser, 1982). Prefabrike paneller boyutlarına göre büyük, orta ve küçük boy paneller olarak sınıflandırılmakta; yüksek derecede ısı, ses izolasyonu ve yangın korunumu sağlayabilmektedir (Baş ve Vural, 2019).

Hızlı üretim ve yüksek ısı yalıtımı avantajı sağlayan paneller; yaygın olarak beton, ahşap malzemeyle ya da farklı yalıtım katmanlarından oluşturulmuş sandviç plaklar halinde üretilmektedir. Birbirlerine geçmeli monte edilebildikleri gibi, bir iskelet sistemin içerisine de monte edilebilmektedirler.

Panel üretimleri; kapı, pencere vb. elemanlar için uygun boşluklara sahip modüller halinde yapılabilmektedir. OMA tarafından 2020 yılında İsveç'te inşa edilen Norra Tormen binasında kullanılan prefabrik paneller cephe boşluklarına uygun üretilmişlerdir. (Şekil 4)



Şekil 4. Norra Tormen binasında kullanılan prefabrik panel sistemi (URL-2)

Paneller kullanılacağı yere ve binaya göre yalıtımlı, yalıtımsız ya da farklı özelliklerde üretilebilmektedir. Günümüzde yapı dış duvarlarının arası yalıtımlı panel elemanlar kullanılarak üretilmesi; özellikle düşük enerjili bina inşasında sıklıkla kullanılmaktadır. Sandviç panel olarak üretilen arası yalıtımlı elemanlar; düşük ısı iletkenlik değeri ile binanın ısıtma/soğutma enerjisi ihtiyacını büyük oranda düşürebilmektedir.

2.2.3. Prefabrik Hücre Sistemler

Duvar ve döşeme panellerinin birleştirilerek üretilen hacimsel, 3 boyutlu prefabrik elemanlara hücre denilmektedir. Hücreler tek başlarına ya da bir araya gelerek bir yapıyı oluşturabilirler. Prefabrik hücre sistemler açık ve kapalı hücreler olarak iki sınıfta incelenmektedir. (Türkçü, 1988). Kapalı sistemlerde duvarlar taşıyıcılık görevi yapmaktadır ve şantiyede üst üste yığılma biçiminde ya da bir iskelet sistemin gözlerine yerleştirilmek suretiyle inşaat tamamlanabilmektedir. Açık hücreli sistemlerde hücrenin enlemesine ya da boylamasına yüzeyleri açıktır (Eser, 1982). Genel olarak hücrelerin üretildiği modül boyutlarından daha geniş hacimlere ihtiyaç duyulduğunda, açık hücreli prefabrik sistemler tercih edilmektedir. Kapalı modüllerde ise; zemin ya da döşeme panelleri üst üste ya da yan yana geldiği durumlarda çift yüzey oluşturdukları için, ses, ısı ve yangın yalıtımı açısından avantajlar oluşmaktadır. (Sezer ve Koman, 2021)

Hücre sistemler çelik, betonarme ve ahşap malzeme ile üretilmeye uygundur. Diğer prefabrik sistemlerle karşılaştırıldığında; daha yüksek oranda fabrikasyon, ince işçiliğin tamamlanmasına olanak sağlaması, şantiyede üretimin minimize edilmesi, tesisat, pencere, kapı gibi elemanların ön montajının fabrika ortamında yapılması gibi konularda daha yüksek avantaj sağlamaktadır.

Ancak; üretimden şantiyeye nakliye ve montaj aşamalarında daha organize iş gücü gerektirmektedir. Prefabrik hücre sistem kullanılarak üretilmiş yapılardan Habitat 67; kapalı hücre prefabrikasyonla üst üste yığılma olarak inşa edilmiştir. Nakagin Kapsül Kulesi ise; kapalı prefabrikasyon hücrelerin merkezde bulunan çekirdeğe takılarak üretildiği bir yapıdır.

3.1 Prefabrik Sistemlerle İnşa Edilen Yapılarda Enerji Etkinlik

Prefabrik sistemler şantiye alanındaki üretimi, kaynak tüketimini, iş gücünü, atık üretimini önemli ölçüde azaltıp yapı üretim sürecini hızlandırdığı için üretim aşamasında kaynak ve enerji tüketimini büyük oranda azaltmaktadır. Hem zaman hem de malzeme hem de üretim enerjisi açısından büyük avantaj sağlayan prefabrik sistemler; binanın yaşam boyu enerji tüketiminin azaltılmasında da etkin rol oynamaktadır.

Prefabrik sistemler malzeme açısından geri dönüştürülebilir ya da doğal malzeme kullanımına uygundur. Ayrıca sistem olarak da yüksek yalıtımlı duvar/döşeme paneli

üretimi ya da ısı yalıtım malzemesi yerleştirilebilecek çatı iskeleti üretimi gibi olanaklar olduğu için, yapı kabuğunun prefabrik elemanlar kullanılarak yüksek yalıtımlı hale getirilmesi mümkündür.

Çalışmada prefabrik sistemler kullanılarak üretilmiş yüksek yalıtımlı düşük ısıl iletkenlik değerlerine sahip, düşük enerji tüketen yapılar; kullanılan sistemler ve elde edilen enerji verimliliği açısından incelenmiştir.

İncelenen örneklerden 1 numaralı yapı 2022 yılında Yeni Zelanda'da inşa edilmiş bir konut yapısıdır (Şekil 5). Yapının duvarları, döşemeleri ve çatısı prefabrik ahşap panel ile zemin döşemesi beton panellerle oluşturulmuştur. Yapının hava geçirimsizlik performansı 0,26/h ile oldukça yüksektir.

Dış duvarlarda kullanılan yalıtım tabakalı ahşap paneller ile duvar ısıl iletkenlik değerinde (U-değeri) 0,23 W/m²K'e ulaşılmıştır. Yapının zemin döşemesinde, arasında 10 cm. XPS bulunan beton sandviç paneller kullanılarak 0,22 W/m²K U-değeri elde edilmiştir. Çatıda mertekler arasında 24 cm. yalıtım kullanılmış ve çatının U-değeri 0,15 W/m²K olmuştur. Binanın çatısına yerleştirilen Fotovoltaik (PV) paneller ile 57 kWh/m²y üretim yapılmaktadır. Binanın toplam enerji ihtiyacı 129 kWh/m²y iken; bu enerjinin 39 kWh/m²y'ı yenilenebilir enerji kaynaklarından (PER) karşılanmaktadır (URL-3).



Şekil 5. 1 numaralı yapı ve prefabrik panel montajı (URL-3)

2 numaralı yapı 2019 yılında İspanya'da inşa edilmiştir. Ahşap iskelet sistem ve ahşap paneller karma olarak kullanılmıştır. Dış duvarlarda OSB panellerin dışında 10 cm. EPS kullanılmıştır. Çatıda ise mertek aralarında 20 cm. mineral yün yalıtımı kullanılmıştır (Şekil 6). Yapının strüktüründe ahşap malzeme tercih edilerek gömülü enerji minimuma indirilmiş, diğer tüm malzemelerde geri dönüşüm endüstrisinden, formaldehit içermeyen ürünler tercih edilerek çevre üzerindeki etki minimize edilmiştir. Yapının birincil enerji ihtiyacının 68 kWh/m² y kadarı fosil yakıtlardan 44 kWh/m² y kadarı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. (URL-4)



Şekil 6. 2 numaralı yapı görseli, ahşap prefabrik iskelet ve panel sistem (URL-5)

İspanya'da 2017 yılında her biri 69 m² büyüklüğünde inşa edilen 3 numaralı örnek; birbirinin aynısı yapı grubudur. Konut olarak kullanılan iki katlı yapıların birinci katlarında günlük kullanım alanı, mutfak ve banyo, ikinci katlarında ise üç yatak odası, banyo ve depo bulunmaktadır. Yapıların duvarları 26 cm. kalınlığında yalıtımlı prefabrik panellerle oluşturulmuştur (Şekil 7). Duvarlarda elde edilen U-değeri 0,139 W/m²K'dir. Yüksek yalıtımlı yapı kabuğu ile yapının yıllık enerji ihtiyacı 119 kWh/m² y, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı ise 13 kWh/m² y olmuştur (URL-6).



Şekil 7. 3 numaralı yapı ve prefabrik panel kullanımı (URL-6) (URL-7)

2017 yılında Romanya'da inşa edilen 326 m² kullanım alanına sahip 4 numaralı yapı; güney cephesinden gün ışığını doğrudan içeri alarak ısıttığı iç ortam sayesinde, yıllık sadece 2 kWh/m²y ısıtma enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Yapıda duvarları oluşturmak için; 3x1,2 m. boyutlarında 105 kg/m³ yoğunluğunda modüler prefabrik saman paneller kullanılmıştır (Şekil 8). Prefabrik panellerle oluşturulan duvarların U-değeri 0,080 W/m²K'dir. Binada kullanılan paneller; doğal, ekolojik ve sürdürülebilir malzemedir. Düşük ısı iletkenlik değerine sahip yapı kabuğu ile binanın yenilebilir enerji kaynaklarından karşılanan enerji ihtiyacı 29 kWh/m² y, birincil enerji ihtiyacı ise 63 kWh/m² y'dür (URL-8).



Şekil 8. 4 numaralı yapı, prefabrik iskelet ve panel kullanımı (URL-8) (URL-9)

2021 yılında İngiltere'de inşa edilen 110 m² kullanım alanına sahip 5 numaralı yapı olan otelin; duvar, çatı ve döşemelerinde prefabrik ahşap paneller kullanılmıştır (Şekil 9). Panel katmanlarında kullanılan yalıtımla; dış duvarlarda ve çatıda 0,089 W/m²K U-değerine ulaşmıştır.

Yapı Ekim 2021-Ekim 2022 arasında yalnızca haftasonları kullanılmış, bu süreçte toplam 2030 kWh enerji tüketilmiştir. Binaya entegre edilmiş PV paneller; 1 yıllık bu süreçte, 2840 kWh enerji üretmiştir. İhtiyaç duyulan enerjinin 108 kWh/m² y'sı fosil yakıt kaynaklarından, 54 kWh/m² kWh/m² y'sı üretilen enerjiden karşılanmaktadır (URL-10) (URL-11).



Şekil 9. 5 numaralı yapı ve yapıda kullanılan prefabrik panel montajı (URL-10) (URL-11)

Düşük çevresel etkiye sahip atık kağıttan geri dönüştürülmüş selüloz lifi ve ahşap lif gibi içerikle üretilmiş bir prefabrik hücre sistem olan 6 numaralı yapı Eco Hub; 2022 yılında Barcelona'da inşa edilmiştir. Yapı; sürdürülebilirlik ve inovasyon merkezi işlevine uygun olarak; inşaat sürecinde de çevreye en az etki bırakacak hassasiyetle tasarlanıp üretilmiştir. Prefabrik sistemlerin strüktürlerine göre sınıflandırmasına göre; ahşap tek modülden oluşan hücre sistemdir (Şekil 10). Çift cidarlı yapı kabuğu; iki OSB arasında duvarda 14,5 cm., zeminde 20 cm., çatıda 20 cm. ısı yalıtımlıdır.

Oldukça kompakt tasarıma sahip yapı; duvarlarda $0,271 \text{ W/m}^2\text{K}$ zeminde $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ çatıda ise $0,218 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-değerine sahiptir. Aynı zamanda; üretilen modül gerektiğinde sökülüp farklı yerde tekrar kullanılmaya uygun olarak tasarlanmıştır. Yapının 88 Kwh/m^2 y olan yıllık enerji ihtiyacının 54 Kwh/m^2 y'sı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. (URL-12)



Şekil 10. Ahşap prefabrik hücre uygulaması 6 numaralı yapı (URL-12)

Şantiye dışında prefabrik olarak üretilen Avustralya'da bulunan 7 numaralı yapı; 100 m^2 lik bir konuttur. Yapının boşluklarına uygun tasarlanmış büyük boyutlu lamine ahşap duvar, döşeme ve çatı panellerinin şantiye alanında kurulumu 15 saat içinde tamamlanmıştır. Yapının kurulumu tamamlandıktan sonra; yerel ağaç olan Blackbutt çitallerle cephe kaplaması yapılmıştır (Şekil 11).

Yapının tüm elemanlarının prefabrik olması sebebiyle hızlı üretime imkan sağlanmış; aynı zamanda sızdırmazlığı yüksek, ısı iletkenliği az, enerji ihtiyacı düşük bir bina elde edilmiştir. Yapının dış duvarlarında 12 cm., zemininde 5 cm, çatısında ise 18 cm. yalıtım kullanılmıştır. Üretilen yapının ısıtma enerjisi ihtiyacı; 7 kWh/m^2 , birincil enerji ihtiyacı ise 90 kWh/m^2 y dir. (URL-14)



Şekil 11. Prefabrik ahşap panellerle inşa edilen 7 numaralı yapı (URL-13) (URL-14)

8 numaralı örnek; Barselona'da inşa edilen 107 m² kullanım alanına sahip bir konut yapısıdır. Yapının duvarları; çelik çerçeve içerisine yerleştirilmiş yalıtım ve kaplama katmanlarından oluşturulmuş prefabrik paneller kullanılarak inşa edilmiştir. Panelleri oluşturan katmanlarda; PIR, EPS gibi yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. Paneller yapıdaki kapı, pencere vb. boşluklara uygun, yapıya özel, şantiye alanı dışında üretilmişlerdir (Şekil 12).

Yapının Düşük Enerjili Bina sertifikası bulunmaktadır. Prefabrik panel dış duvarların U-değeri 0,211 W/m²K 'dir. Yapının yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 19 kWh/m², fosil yakıt kullanımıyla karşılanan birincil enerji ihtiyacı 113 kWh/m², yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı ile karşılanan enerji ihtiyacı ise 75 kWh/m² dir (URL-16).



Şekil 12. Prefabrik kompozit panel kullanılarak inşa edilen 8 numaralı yapı (URL-15) (URL-16)

Huzurevi işlevli 540 m² kullanım alanına sahip 9 numaralı yapı, 2019 yılında Barselona'da inşa edilmiştir. Yapının inşasında prefabrik ahşap iskelet sistem ve prefabrik ahşap panel sistem birlikte kullanılmıştır (Şekil 13). Barselona'da bir fabrikada üretilen ahşap elemanlar, 1 hafta gibi kısa bir sürede şantiye alanında monte edilmiştir. Yapı üretiminde zaman açısından büyük tasarruf sağlanırken, yüksek termal performansa da ulaşılmıştır.

Yapıya entegre edilen PV paneller ile tükettiği enerjiden daha fazla üreten bir bina elde edilmiştir. Prefabrik duvar panellerinde 20 cm. ısı yalıtımı yapılarak 0,195 W/m²K U-değerine ulaşılmıştır. Huzurevi olarak kullanılan yapıda ahşap prefabrik elemanların kullanımıyla huzurlu, sıcak ve konforlu bir ev hissi yaşatmak istenmiştir (URL-17) (URL-18).



Şekil 13. Prefabrik ahşap iskelet ve ahşap panel kullanılarak inşa edilen 9 numaralı yapı (URL-17) (URL-18)

Barcelona'da bulunan 10 numaralı yapı 142 m² kullanım alanına sahip iki katlı bir konuttur. Yapı; prefabrik ahşap iskelet sistem ve prefabrik ahşap paneller ile inşa edilmiştir (Şekil 14). Yapının duvarlarında ve tavan döşemesinde, iki katman arası ısı yalıtımlı ahşap paneller kullanılmıştır. Prefabrik ahşap paneller kullanılarak üretilen duvarlarda 0,145 W/m²K, çatıda 0,101 W/m²K U- değerlerine ulaşılmıştır. Zeminde ise beton döşeme üstüne 16 cm. XPS yalıtım uygulanmıştır. Yapının yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 8 kWh/m² iken; enerji ihtiyacının 40 kWh/m²'i yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. (URL-19) (URL-20)



Şekil 14. Prefabrik ahşap iskelet ve prefabrik ahşap panel ile inşa edilen 10 numaralı yapı (URL-19) (URL-20)

11 numaralı yapı İngiltere'de 2018 yılında inşa edilmiş 357 m² büyüklüğünde bir konut yapısıdır. Yapının duvarlarında prefabrik SIP (yapısal yalıtımlı panel) paneller kullanılmıştır (Şekil 15). Yapının panel sistem kullanılarak oluşturulan dış duvarları; oluşturulmak istenen görsel algı doğrultusunda tuğla ile kaplanmıştır. Prefabrik paneller ile tuğla arasında ısı yalıtımı kullanılmıştır ve duvarlarda elde edilen nihai U-değer, 0,11 W/m²K olmuştur. Yapının yerleşimi, yönlenebilirliği ve açıklıkları gün ışığından maksimum faydalanacak şekilde tasarlanmıştır ve ısıtma enerjisi ihtiyacı; tasarım kararları ve yüksek düzeyde yalıtımla minimize edilmiştir.

2 yıllık bina enerji performansı verilerine göre; karbon negatif, enerji pozitif, işletme maliyeti negatif olan, tükettiğinden %40 fazla enerji üreten bir bina olduğu saptanmıştır. Binada üretilen enerji yıllık 30 kWh/m² y'dır. Binanın ısıtma enerjisi ihtiyacı ise 13 kWh/m² y'dır (URL-22).



Şekil 15. Prefabrik kompozit panel kullanılarak inşa edilen 11 numaralı yapı (URL-21) (URL-22) (URL-23)

Prefabrik ahşap hücrelerin yan yana/üst üste monte edilmesi yöntemiyle üretilen 12 numaralı yapı Avusturya'da bulunmaktadır. Yurt işlevli, iki katlı yapı, 1003 m² kullanım alanına sahiptir. Ahşap malzemeye kapalı sistem hücre olarak üretilen modüllerin şantiye alanında montajı, 1 haftada tamamlanmıştır (Şekil 16). Ön üretilmiş kapalı hücreler; duvarlar, döşeme, tavan, pencereler, panjurlar, aydınlatma ve tesisat gibi tüm bileşenleri içerecek şekilde fabrikada tamamlanıp şantiyeye nakliyesi sağlanmıştır.

Tüm yapıda 5 tanesi zemin katta 5 tanesi bir üst katta olmak üzere 10 hücre kullanılmıştır. Duvarların U-değeri 0,106 W/m²K, zemin döşemesinin U-değeri 0,129 W/m²K, çatısının U-değeri ise 0,135 W/m²K'dir. Yapının yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 10 kWh/m²y, birincil enerji ihtiyacı ise 109 kWh/m²y'dir. (URL-24)



Şekil 16. Prefabrik hücre sistem kullanılarak inşa edilen 12 numaralı yapı (URL-24)

Çalışma kapsamında prefabrik yapım sistemleri kullanılarak inşa edilmiş, düşük enerji tüketen 12 yapı incelenmiştir. Prefabrikasyonun düşük enerjili bina üretimindeki yerini araştırmak amacıyla; incelenen örneklerde duvarlar, çatı, zeminde elde edilen U-değerleri, varsa yenilenebilir enerji kaynaklarından kazanım ve enerji ihtiyacına dair veriler Tablo 1 de gösterilmektedir. Ayrıca incelenen örneklerde kullanılan prefabrik sistemler, sistemin malzemesi, yapının bulunduğu yer ve yapım yılı gibi bilgiler de Tablo 1' de gösterilmektedir.

Tablo 1. İncelenen yapılarda kullanılan prefabrik sistemler, yapıların fiziksel özellikleri ve enerji ihtiyacına dair analiz

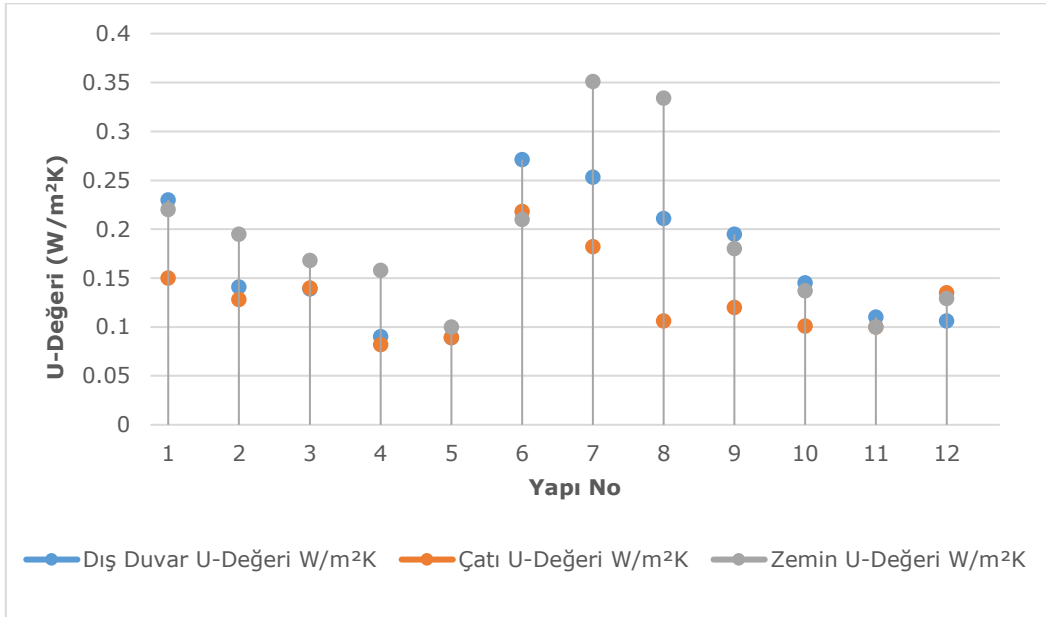
| No | Yapım Yeri | Yapım Yılı | Yapı Tipi | Kullanım Alanı m ² | Prefabrik Sistem | Dış Duvar U-Değeri W/m ² K | Çatı U-Değeri W/m ² K | Zemin U-Değeri W/m ² K | Isıtma Enerjisi İhtiyacı kWh/m ² y | Toplam Enerji İhtiyacı * kWh/m ² y |
|----|-------------------------------|------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 1 | Christchurch, Yeni Zelanda | 2022 | Konut | 143 | Ahşap Panel | 0,23 | 0,15 | 0,22 | 16 | 39 PER 90 PE |
| 2 | Madrid, İspanya | 2019 | Konut | 155 | Ahşap İskelet Ahşap Panel | 0,141 | 0,128 | 0,195 | 15 | 44 PER 68 PE |
| 3 | Burgos, İspanya | 2017 | Konut | 69 | Ahşap Panel | 0,139 | 0,14 | 0,168 | 13 | 119 PE |
| 4 | Bükreş, Romanya | 2017 | Konut | 326 | Ahşap İskelet Ahşap Panel | 0,09 | 0,082 | 0,158 | 2 | 29 PER 63 PE |
| 5 | Penrith, İngiltere | 2021 | Otel | 110 | Ahşap Panel | 0,089 | 0,089 | 0,1 | 14 | 54 PER 108 PE |
| 6 | Barselona, İspanya | 2022 | Eğitim yapısı | 100 | Ahşap Hücre | 0,271 | 0,218 | 0,21 | 13 | 54 PER |
| 7 | Balgowlah, Avustralya | 2019 | Konut | 100 | Ahşap Panel | 0,253 | 0,182 | 0,351 | 7 | 90 PE |
| 8 | Barselona, İspanya | 2019 | Konut | 107 | Beton Panel | 0,211 | 0,106 | 0,334 | 19 | 75 PER 113 PE |
| 9 | Camarzana de Tera, İspanya | 2019 | Huzurevi | 540 | Ahşap İskelet Ahşap Panel | 0,195 | 0,12 | 0,18 | 15 | 58 PER 119 PE |
| 10 | Barselona, İspanya | 2019 | Konut | 142 | Ahşap İskelet Ahşap Panel | 0,145 | 0,101 | 0,137 | 8 | 40 PER 101 PE |
| 11 | Exeter, İngiltere | 2018 | Konut | 357 | Beton Panel | 0,11 | 0,1 | 0,1 | 13 | 26 PER 66 PE |
| 12 | Viyana, Avusturya | 2017 | Yurt | 1003 | Ahşap Hücre | 0,106 | 0,135 | 0,129 | 10 | 109 PE |

* Birincil enerji ihtiyacı (PE), Yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanan birincil enerji ihtiyacı (PER)

SONUÇ

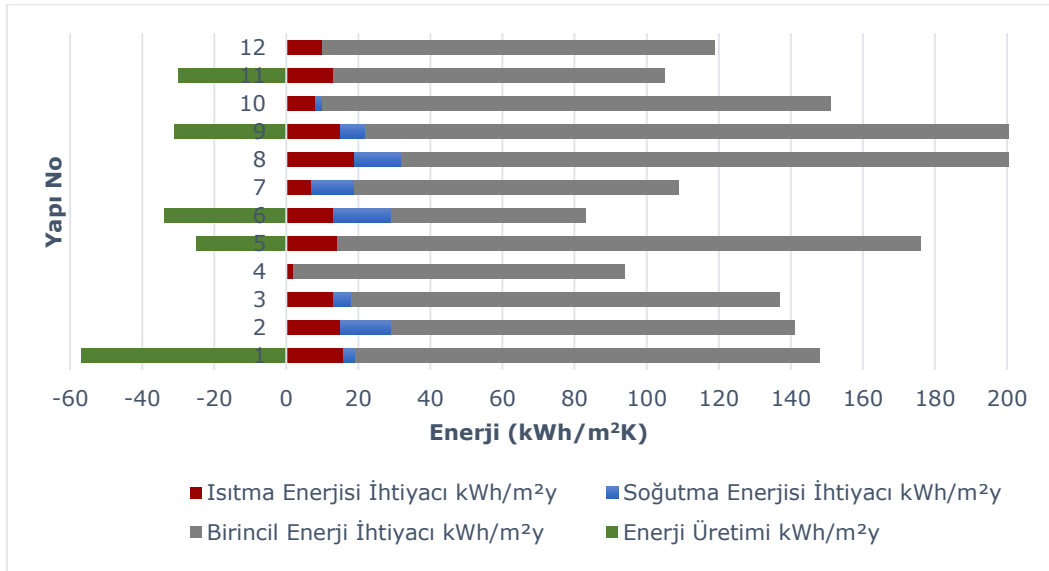
Bu çalışmada; yapı malzemelerine göre ve yapım sistemlerine göre prefabrik sistemler araştırılmıştır. Araştırmanın devamında; prefabrik sistemler kullanılarak inşa edilmiş farklı yapılar, kullanılan sistem ve yapının enerji verimliliği açısından incelenmiştir. Ele alınan örnek yapıların çoğunluğunda ahşap sistemler kullanılmıştır. Dünya genelinde ahşap yapım sistemleri; özellikle küçük ölçekli binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca prefabrik paneller yapıların duvar ve çatılarında hem inşaat hızı, yapım pratikliği, imalat kolaylığı vb. sebeplerle kullanılırken hem de yalıtım katmanları ile oluşturulan paneller büyük oranda ısı yalıtımı sağlamaktadır. Ayrıca incelenen örneklerde yapıların tamamında sızdırmazlık üst düzeyde sağlanmıştır.

İncelenen yapılarda yapı kabuğu elemanları olan duvarlar, çatı ve zemindeki U-değerleri Şekil 17'de gösterilmektedir. Yapıların tamamının duvarlarında yüksek yalıtım sonucunda elde edilen en yüksek U- değeri 0-271 W/m²K 'dir. İncelenen yapıların tamamının duvarları prefabrik sistemler kullanılarak inşa edilmiştir. Yapıların zeminlerindeki en yüksek U-değeri 0,351 W/m²K, çatıdaki en yüksek U-değeri ise 0,218 W/m²K'dir.



Şekil 17. İncelenen yapılarda yapı kabuğunun ısı iletkenlik değeri

Prefabrik sistemler kullanılarak inşa edilen enerji verimliliği yüksek binaların bir kısmında, enerji üretimi de yapılmakta, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmaktadır. Yüksek yalıtımlı yapı kabuğu sayesinde; ısıtma ve soğutma için ihtiyaç duyulan enerji minimize edilmiştir. Yapıların yıllık metrekare başına ısıtma enerjisi ihtiyacı 2 kWh/m²y ile 19 kWh/m²y arasında değişmektedir. Metrekare başına yıllık soğutma enerjisi ihtiyacı ise en yüksek 16 kWh/m²y ile Barcelona’da bulunan 6 numaralı eğitim yapısındadır. İncelenen yapılara ait ısıtma, soğutma, birincil enerji ihtiyaçları ve üretilen enerji Şekil 18’de gösterilmektedir.



Şekil 18. İncelenen yapılarda enerji ihtiyacı ve üretimi

Günümüzde inşaat sektöründe üretim aşamasında kaynak tüketimi ve iş gücü maliyetleri yüksek düzeydedir. Prefabrik sistemler kullanılarak inşa edilen yapılar hem inşaat aşamasında hem de yaşam döngüsünde büyük enerji tasarrufu sağlamaktadır. Hızla artan nüfus, göçler gibi sebeplerle kaynaklar etkin ve verimli kullanılırken teknoloji en yüksek oranda faydalanarak yapı üretimi yapılması artık gereklilik haline gelmiştir.

Prefabrik sistemlerle yapı inşası önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunlardan başlıcaları;

- İnşaat süresini kısaltarak hızlı bir şekilde bina inşa edilmesini sağlamakta,
- Şantiye alanında yapılan imalatları azaltarak şantiyede daha az iş gücüne ihtiyaç duyulmasını sağlamakta,
- Prefabrik elemanlarda üretimler standart olduğu için hataları azaltmakta,
- Yapının temeli gibi yerinde üretilen yapı elemanları haricinde, kalıp işçiliğine çok az düzeyde ihtiyaç duyulmakta,
- Prefabrik elemanın kullanım yerine göre alternatif yalıtım malzemesi tercih edilebileceğinden, yüksek yalıtımlı yapı kabuğu oluşturulmasına olanak sağlamakta,
- Fabrika ortamında üretim yapıldığı için, geri dönüştürülebilir malzeme ile imalatın konvansiyonel sistemlere göre daha büyük oranda kullanımına olanak sağlamakta,
- Ön üretilmiş elemanların şantiye alanında montajına dayalı bir sistem olduğu için, konvansiyonel ve geleneksel sistemlere göre şantiye alanındaki yapı üretimi esnasında çok daha az düzeyde enerjiye ihtiyaç duyulmakta,
- Prefabrik elemanlar seri üretimle ve belirli bir standardizasyonla üretilip süreç içerisinde sürekli geliştirildikleri için, üretilen yapı elemanları yüksek standarta ulaşmakta,
- Yaşam döngüsü boyunca konfor koşullarının sürekliliğini sağlamakta,
- Prefabrik sistemlerle, ısıtma/soğutma için ihtiyaç duyulan enerjinin büyük oranda azaltıldığı, enerji verimliliği yüksek binalar inşa edilmektedir.

Hem üretim aşamasında hem de kullanım aşamasında çevresel etkiyi azaltan aynı zamanda hızlı üretilen, hata miktarı azaltılmış, şantiyedeki iş gücünü en aza indiren ve sonuç olarak kullanıcıya konforlu bir yaşam sağlayabilen prefabrik yapının bina yapımında tercih edilmesiyle, yukarıda belirtildiği gibi; pek çok açıdan avantaj sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Addis, B. (2006). The Crystal Palace and its place in structural history. *International Journal of Space Structures*, 21(1), 3-19.
- Amani, A., & Niyazi, A. Q. (2018). Türkiye’de Prefabrik Yapı Sektörünün Hızlı Gelişimi. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 487-494.
- Arif, M., & Egbu, C. (2010). Making a case for offsite construction in China. *Engineering, construction and architectural management*, 17(6), 536-548.
- Arslan, B. A. (2023). *Önüretimli panel duvar sisteminin çevresel etki ve enerji tüketimi bağlamında yerinde yapım dolgu duvar sistemi ile karşılaştırmalı değerlendirmesi*. Yüksek Lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baş, Y. G., & Vural, N. (2019). Prefabriğe Beton Panel Sistemlerin Konut Üretiminde Kullanım Olanakları. *Online Journal of Art and Design*, 7(4), 124-133.
- Eser, L. (1982). *Ön yapım endüstrileşmiş yapı*. İTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi.
- Garay, R., Pfenniger, F., Castillo, M., & Fritz, C. (2021). Quality and sustainability indicators of the prefabricated wood housing industry—A Chilean case study. *Sustainability*, 13(15), 8523.
- Gönül, H., & Demirel, F. (2003). Prefabriğe Endüstri Yapıları Üzerine Bir Alan Araştırması: Diyarbakır Birinci Organize Sanayi Bölgesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(1).
- Guthrie, R. I., & Isac, M. M. (2022). Continuous casting practices for steel: Past, present and future. *Metals*, 12(5), 862.
- İrban, M. Y., & Fenkli, M. (2022). Çelik Prefabrik Yapılarda Sürdürülebilirlik. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 26-31.
- Khan, K., Chen, Z., Liu, J., & Javed, K. (2023). State-of-the-Art on Technological Developments and Adaptability of Prefabricated Industrial Steel Buildings. *Applied Sciences*, 13(2), 685.
- Lacey, A. W., Chen, W., Hao, H., & Bi, K. (2018). Structural response of modular buildings—an overview. *Journal of building engineering*, 16, 45-56.



- Pizzi, M. (2003). The invention of the Balloon Frame, how it affected architecture in the New World. The case of Chile. In *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (Vol. 20, p. 24th).
- Seitablaiev, M. Ö., & Umaroğulları, F. (2020). Dünya'da ve Türkiye'de Betonarme Prefabrikasyon. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 5(2), 309-320.
- Sezer, G. T., & Koman, İ. (2021) Modüler Hücre Yapımın Çok Katlı Binalar Bağlamında İncelenmesi. *bab Journal of FSMVU Faculty of Architecture and Design*, 2(2), 89-104.
- Srisangeerthan, S., Hashemi, M. J., Rajeev, P., Gad, E., & Fernando, S. (2018). Numerical study on the effects of diaphragm stiffness and strength on the seismic response of multi-story modular buildings. *Engineering Structures*, 163, 25-37.
- Türkçü, H. Ç. (1988). *Endüstrileşmiş yapım-konut sorunu açısından irdelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları MM/MİM-88 EY 155: 67.
- Türkçü, H. Ç. (2017). *Yapım: ilkeler-malzemeler-yöntemler-çözümler*. Birsen Yayınevi.

URL LINKLERİ

- URL-1 <https://sozluk.gov.tr/>
- URL-2 <https://www.oma.com/projects/norra-tornen>
- URL-3 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6924 (Erişim tarihi: 07.05.2023)
- URL-4 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6482 (Erişim tarihi: 14.05.2023)
- URL-5 Project Documentation, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6482 (Erişim tarihi: 14.05.2023)
- URL-6 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6430 (Erişim tarihi: 13.05.2023)
- URL-7 Archdaily, <https://www.archdaily.com/280939/48-logements-vitry-sur-seine-gaetan-le-penhuel-architecture> (Erişim tarihi: 22.05.2023)
- URL-8 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6202 (Erişim tarihi: 22.05.2023)
- URL-9 Biobuilds, <https://www.biobuilds.com/prefab> (Erişim tarihi: 22.05.2023)
- URL-10 Project Documentation, file:///C:/Users/Administrator/Downloads/ph_Hayden_Penrith_7086%20(1).pdf (Erişim tarihi: 22.05.2023)
- URL-11 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_7086 (Erişim tarihi: 05.04.2023)
- URL-12 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6937 (Erişim tarihi: 05.04.2023)
- URL-13 <https://www.bettiundknut.com.au/clt-passivhaus> (Erişim tarihi: 07.05.2023)
- URL-14 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6374 (Erişim tarihi: 18.04.2023)
- URL-15 Evowall, <https://evowall.com/en/passive-houses/> (Erişim tarihi: 18.04.2023)
- URL-16 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6305 (Erişim tarihi: 02.01.2023)
- URL-17 Cso Arquitectura, <https://www.csoarquitectura.com/portfolio/ampliacion-residencia-de-ancianos/> (Erişim tarihi: 02.01.2023)
- URL-18 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6056 (Erişim tarihi: 05.05.2023)
- URL-19 Project Documentation, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_5919 (Erişim tarihi: 13.02.2023)
- URL-20 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_5919 (Erişim tarihi: 13.03.2023)
- URL-21 Project Documentation, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6343 (Erişim tarihi: 16.02.2023)
- URL-22 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_6343 (Erişim tarihi: 16.02.2023)



- URL-23 The walled garden, <https://thewalledgardendevon.wordpress.com/> (Erişim tarihi: 14.02.2023)
- URL-24 Passive House, https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_5195 (Erişim tarihi: 14.02.2023)