

Yapılardaki Kat Adedinin Büyük Kentlerin Güneş Enerjisinden Akılcı Yararlanmasına Etkileri

Birol Kılıç*

ÖZ

Bu çalışmada, yoğun ve dikey kentleşme özelinde güneş enerjisinden akılcı yararlanma yöntemlerinin sürdürülebilir çözümleri araştırılmıştır. Bu bağlamda, çok yüksek katlı, cam giydirmeli bina cephelerindeki alüminyum malzemenin ve saydam PV gözelerinin gömülü enerji ve ekserjilerinin, bunlara bağlı olarak da gömülü CO₂ salımlarının fazlalığı ve diğer fiziksel kısıtlar nedeni ile güneş enerjisinden akılcı ve çevreci biçimde etkin yararlanılmasının mümkün olmadığı görülmüştür. Güneş enerjisinden yararlanmada yüksek binaların komşu binaları gölgeleme etkisinin de yasal sorunları olabileceği üzerinde durulmuştur. Makalede, yapı çevre güneş enerjisinin etkin kullanımında en akılcı çözümün bireysel binalar yerine bölge enerji sistemlerinin geliştirilip yaygınlaştırılması olduğu öne sürülmekte, somut örnekler verilerek sadece güneş değil, rüzgâr, jeotermal ve biyogaz gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin melez kullanımının önemi işaret edilerek CO₂ salımlarını azaltma amaçlı yeni bir şehir planlama modeline olan gereksinim belirtilmektedir. Yatay ve yaygın kentleşmenin alt yapı ve ulaşımına ilişkin ek yatırım ve işletim giderleri ile buna bağlı ek CO₂ salımlarının da göz önünde tutulduğu bir enuygun çözüm algoritması tanıtılmaktadır. Örnek çalışmalarla yüksek binalar yerine yaygın kentleşmeye özen gösterilmesine dikkat çekilmektedir. Enuygun Kentleşme Modeli adı verilen bu algoritmanın anlatımı yanı sıra yenilikçi bir örnek olarak tasarlanan güneş ve rüzgâr enerjili hidrojen evi tanıtılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cam cepheli yüksek binalar, gömülü CO₂ salımı, PV göze, PVT panel, akılcı ekserji yönetimi modeli, hidrojen ekonomisi

The Impact of High-Rise Buildings on the Rational Utilization of Solar Energy in Large Cities

ABSTRACT

This study investigates the effective solutions for the rational utilization of solar energy in dense cities of vertical urbanization. Taking into account the high embodiment of energy and exergy of transparent PV cells mounted on glass facades and structural aluminum material with associated embodied CO₂ emission responsibilities, it has been concluded that in high-rise buildings with glass facades along with other physical constraints, exergy and energy-rational utilization of solar energy is not possible. Furthermore, it is stated that legal issues may arise due to solar shading on neighboring buildings. By providing tangible examples, it has been shown that in addition to solar energy, wind, geothermal, and biogas energy systems may be integrated towards hundred-percent renewable cities by employing a carbon-related city-planning model. This paper further emphasizes that the most rational way to utilize solar energy is to develop and diffuse district energy systems into the built environment with hybrid renewables by focusing on a comprehensive decarbonization model. This model indicates that low-rise buildings are more rational, although horizontal cities bear higher investment and operational costs of the wider infrastructure and associated additional CO₂ emissions. The paper concludes that there should be an optimum city planning decision-making model by introducing a new metric. This decision-making mechanism is indexed to total CO₂ emissions and is called the Optimum Urbanization Model. Additionally, a conceptual design of a hydrogen home with solar and wind energy is presented.

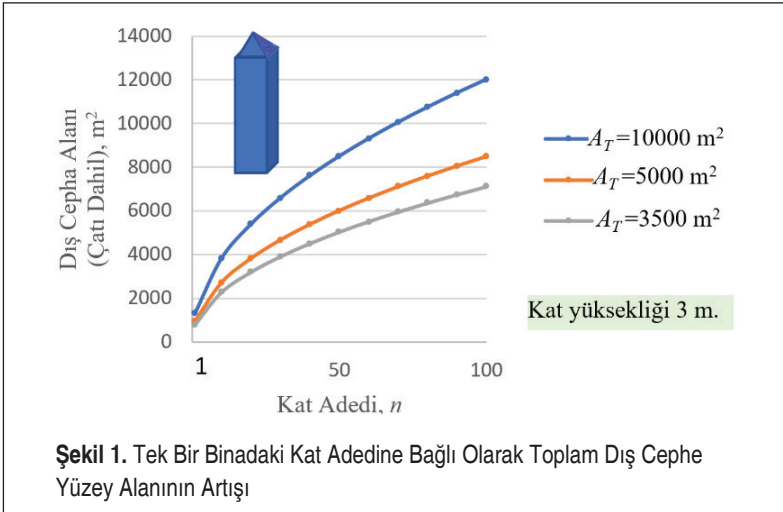
Keywords: High-rise building, glass facades, embodied CO₂, PV cell, PVT panel, rational exergy management model, hydrogen economy

Geliş/Received : 26.12.2019
Kabul/Accepted : 14.05.2020

* Prof. Dr., birolkilkis@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-2580-3910

1. GİRİŞ

Yüksek bina tanımında ve ölçütünde henüz bir fikir birliği yoktur. Örneğin, Almanya’da 21 m üzeri ve insanların sürekli kullanımına açık binalar yüksek bina olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu ölçütün tek dayanağı ise kentlerdeki itfaiye teşkilatının elinde bulunan yangın merdivenlerinin ulaşabileceği yüksekliktir. ASHRAE ise bu yükseklik sınırını 91 m olarak vermektedir [2]. Bu tür pratik kısıtların etkili olduğu ölçütler nedeni ile *çok katlı bina* yerine *yüksek bina* terimine doğru bir eğilim bulunmaktadır. Ancak inşaat ve işletim enerji maliyetleri, inşaat sırasındaki gömülü enerji, ekserji ve CO₂ salımları söz konusu olduğunda kat sayısına ve her kattaki ortalama insan sayısına bağlı olan enerji kullanım eş-zamanlılığı, asansör kullanım sıklığı ve durak (kat) adedi gibi birçok faktör ön plana çıktığında kat adedi önem kazanmaktadır. Zira kat adedi ile insan yoğunluğu, dolayısı ile binaların kent ulaşımına ve altyapısına etkileri arasında doğrudan bir ilişki vardır [3]. Bölge enerji sistemlerinde de bölgedeki ortalama kat adedi oldukça önemlidir, zira ortalama kat adedi arttıkça boru hatlarının uzunluğu kısalmakta ancak borularda aktarılan ısı güç çoğalmaktadır. Boru hatlarındaki ortalama akışkan hızı sabit kalmak üzere boru çapları büyütülerek pompa giderleri ve buna bağlı CO₂ salım sorumlulukları azaltılmaya çalışılır. Bununla birlikte, bir yandan boru çapları büyürken uzunlukları azalır ve bu iki çelişkinin bir kırım noktası bulunmaktadır. Dolayısı ile, ortalama kat sayılarının gömülü CO₂ salımlarına (boru imalatı ve döşenmesi ile ilgili olarak) karşın elektrikle çalışan pompa giderlerindeki çevresel ayak izi azalımı arasındaki ikilemin geri dönüş süresine etkisi genelde olumsuzdur. Diğer bir deyişle ortalama kat adedi arttıkça bölge enerji sisteminin yatırımındaki geri dönüş süresi uzar. Bu ekonomik açıdan da geçerlidir. Tüm bunlara ve 2008 uluslararası mali krizine karşın yüksek bina kavramı bir prestij ölçütü olmaya devam etmekte,



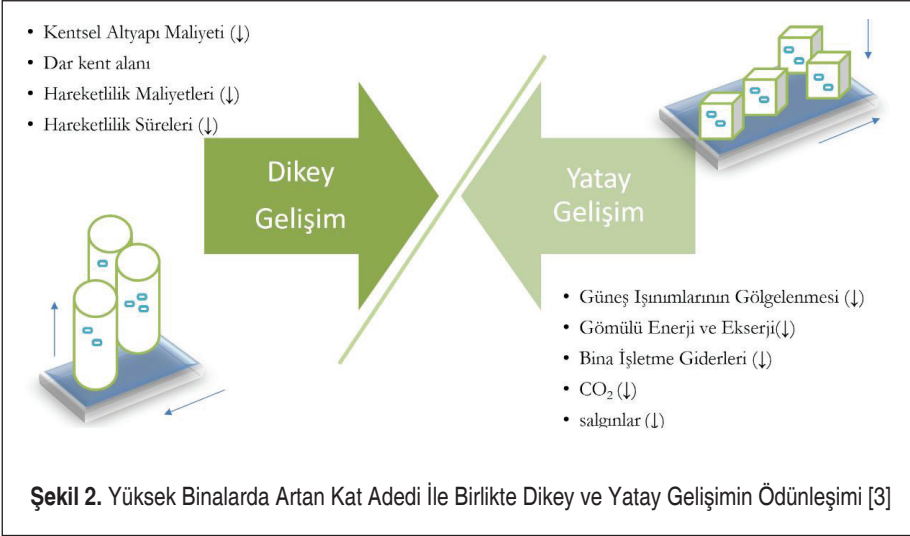
Şekil 1. Tek Bir Binadaki Kat Adedine Bağlı Olarak Toplam Dış Cephe Yüzey Alanının Artışı



ülkeler sırf dünyanın en yüksek binasına sahip olabilmeye çalışmaktadırlar. Halbuki yükseklik ön plana çıkarıldığı sürece belli bir bina toplam kullanım alanı (A_T) için binalar giderek yüksek, narin ve yaklaşık kare kesitli olmaktadır. Bunun sonucunda ise bir binada kat adedi (n) arttıkça bina toplam dış cephe yüzeyi (DCA) de artmaktadır (Şekil 1).

Tek bir yüksek bina ele alındığında, ısı kaybı ve kazançları artmaktadır. Ancak kentleşme açısından bakıldığında belirli bir nüfus yoğunluğu için kat adedi arttıkça kat alanı başına ısı kaybı ve kazançları azalmaktadır [3]. Ancak bu sav çok katlı binaların diğer olumsuzlukları, özellikle cam kafes yapılardaki gömülü CO_2 , ekserji ve enerji miktarları göz önünde tutulduğunda önemini kaybetmemektedir. Ayrıca, yükseklikle rüzgâr zamları da artmaktadır. Bu nedenle kışın dış cephe ısı kayıpları (Isıtma yükü) artar, yazın ise ısı kazançları (Klima yükleri) azalır. Tüm bunların ötesinde, son günlerde hava kirliliği, kentlerde bina sıklığı ve binalardaki insan yoğunluğu arasında da ilişkiler sorgulanmaya başlamıştır [4]. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) verilerine göre Avrupa'nın havası en kirli 10 kentin 8'i Ülkemizde bulunmaktadır. İstanbul ise Avrupa'nın en kirli ikinci mega kentidir [5]. 2018 yılında NO_x salımları ülkemizde 173 istasyonda ölçülmüş, 123 istasyonda tehlike sınırı aşılmıştır [6]. Tüm ülkeler hava kirliliği ve iklimsel ısınmanın en büyük sorumlusu olarak büyük kentleri ve kent-içi ulaşımı görmekteyler. Bunun önüne geçmek üzere değişik önlemlerin strateji planlarına alındığı şu günlerde küresel salgınların yaygınlığında hava kirliliğinin de önemli bir risk etmeni olduğu gündeme gelmiştir [4]. Avrupa Birliğinin %100 yenilenebilir enerji kentlerinde güneş ve rüzgâr enerjisinin önemi vurgulanmakla birlikte çok yoğun kent alanlarında bunun nasıl gerçekleştirilebileceği tartışılma konusudur [7]. Bu bağlamda, hiç olmazsa mega kentlerin yeni genişleme alanlarında kent plancılarının kat yüksekliği ile yaygın kentler arasındaki çelişkinin eniyelenmiş çözümlerle giderilmesine dikkat etmeleri gerekliliği belirtilmektedir. Ancak bu yönde karar verici olabilecek ve kat yüksekliği ile hava kirliliği- özellikle CO_2 salımları- arasındaki doğrudan ilişkiye değinen bilimsel araştırmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Örneğin, Simmonds ASHRAE tarafından yayınlanan yüksek, çok yüksek ve mega yüksek binaların tasarımında daha çok elektro-mekanik tesisat üzerinde durmuş, buna karşın bina yüksekliğinin kentleşmeyi çevresel boyutlarına değinmemiştir [8]. Aynı bağlamda, gerçekleşmesi toplum tarafından hala tartışılan kanal İstanbul projesi buna bir örnektir. ÇED raporunda oluşturulacağı öne sürülen yüzer binin üzerindeki yeni yerleşim alanlarında yüksek binalara da yer verileceği belirtilmektedir. Buna hangi ölçütlere göre karar verildiği ise belli değildir çünkü bu tür bir model ülkemizde ve diğer ülkelerde yoktur. Yapılan bir hesaplama göre yapımı sırasında ülkemizin iki yıllık toplam CO_2 salımlarından daha fazla CO_2 salımına neden olacak bu projenin yüksek binalarla daha da çevreyi kirleteceği modellenmeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına da büyük önem verilmeli idi. Böyle bir bütüncül modellemenin küresel boyuttaki gerekliliği bu projede de ortaya çıkmaktadır. Hava kirliliği ilişkisi bir yana

bırakıldığında kent planlamasında kat yüksekliği ile enerji, kat yüksekliği ile ekonomi, kat yüksekliği ile ulaşım gibi araştırmalara ise sıkça rastlanmaktadır. Bina yüksekliğinin özellikle inşaat sırasındaki gömülü enerji tüketimi üzerinde doğrusal etkisi bulunmaktadır: bina yüksekliği arttıkça inşaat malzemeleri daha yükseğe taşınmakta ve enerji tüketilmektedir [9]. Dawodu ve Cheshmehzangia kullanılabilir toplam döşeme alanının binanın zemine oturduğu alana oranının (*FAR*: Floor Area Ratio) bina işletmesi sırasında enerji tüketimine ve kazançlarına olan etkilerini Çin'in Ningbo kenti için incelemişlerdir. Bu kentte 7 aylık ısıtma mevsimi yaşandığından *FAR* arttıkça (yüksek bina) bir miktar güneşlenme kazancı olsa da bina cephelerinden oluşan ısı kayıplarının çok daha fazla olduğunu derece-gün tabanlı analizlerinde göstermişlerdir [10]. Ancak bu yargının iklime göre çok değişken olduğunu da belirtmişlerdir. Chau ve diğerleri şehir planlamacılarının optimal bina yüksekliğine değişik koşullarda karar verebilmeleri için bir ekonomik çözümleme modeli geliştirmişler ancak işletme sırasındaki CO₂ salım sorumluluklarına ve gömülü enerji, maliyet ve ekserji değerlerine ayrıca işletim sırasındaki doğrudan CO₂ salımlarına değinmemişlerdir [11]. Buna karşın Mert, doktora tezinde enerji verimine odaklı bina bloğu tasarımında ekserjinin önemine değinmiştir [12]. İrlanda hükümeti ise kat yüksekliği konusunda bir yönerge yayınlamıştır [13]. Bu yönergede yüksek binaların oluşturulabilmesi için çok etkin bir ulaşım altyapısının önemi vurgulanmıştır. Bu yönergede de çevre ve hava kirliliği üzerinde durulmamıştır. Kent planlamasında ilk kez olmak üzere, CO₂ gazı salım sorumlulukları ön plana alınarak bir kentleşme modeli bu çalışmada geliştirilmiştir [14, 15]. Bu çalışmalarda hem gömülü CO₂ salımları hem de işletme sırasındaki doğrudan ve önlenebilir CO₂ salımları ele alınmıştır. Doğrudan CO₂ salımlarında tüketilen elektrik enerjisinin karbon ayak izi ve fosil yakıt tüketiminin ayak izi göz önünde bulundurulmuştur. Önlenebilir CO₂ salımları ise binaların tüm sistemlerinin ortalama ekserji verimleri ile ilintilidir [16]. Bu çalışmalarda kent planlamasında yaygın ve dikey kentleşme modellerinin olumlu ve olumsuz yanları karşılaştırılarak yeni bir eniyileme algoritması geliştirilmiştir. Modelin kapsadığı CO₂ tabanlı parametrelere Şekil 2 de betimlenmiştir. Tüm bu küresel boyutlardaki yönelimlere karşın günümüzde cam cepheli yüksek katlı binalar birer prestij, akıllılık, zenginlik ve statü simgesi olmaya ve bu bağlamda kentleşmenin arazi yoğun ve dikey yönde gitmesinin hem sebebi hem sonucu olmaktadır. Adeta gerekçeleri ve gereksinimler tam belli olmadan ve somutlaştırılmadan bir moda rüzgârı estirilmektedir. Özellikle akıllı bina kavramı cam kafesli yüksek binalarla özdeşleşmiştir ki akıllılık bambaşka bir kavramdır. Aslında asansörlerin, pencere perdelerinin, klima sisteminin, mutfakların, aydınlatma sistemlerinin denetlenebilir olması ve otomasyona bağlanması o binanın akıllı olmasında belirli bir paya sahiptir ama asıl olan, enerjinin ve malzemenin çevreye zarar vermeden akılcı kullanımudur. Bu bağlamda, tüketim değil *değerlendirme* ve akıllı değil *akılcı* kelimeleri ön plana çıkarılmalıdır. Bu koşul tüm yenilenebilir (Artık enerji/ısı dahil) enerji kaynakları ve sistemleri için de geçerlidir.



1.1 Kentleşmede Dikey Gelişim ve Güneş Enerjisi

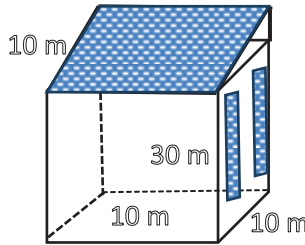
Günümüz binaları özellikle büyük kentlerde yatay değil de dikey yönde gelişmektedir. Böylesi yüksek binalarda ise birim metre kare başına düşen güneş enerjisinden yararlanılacak çatı alanı hemen yok denecek bir düzeye inmektedir. Şekil 3'deki fotoğraf, Londra'da inşa edilmiş bulunan, tamamen cam cephe kaplamalı the Shard of Glass (Cam Kırığı) binasını ve hemen önünde de klasik, 3'er katlı, geniş ve uygun eğimde çatısı bulunan ve en az yüz yıllık bir geçmişe sahip Londra evlerini birlikte göstermenin ötesinde bizlere önemli bir mesaj vermektedir [17]. Kısaca bu mesajda, moda haline gelen, prestij nedeni sayılan ve biraz da yapı çevredekı kısıtlı ve pahalı arazi yüzünden yüksek binaların kat sayıları arttıkça güneş enerjisinden etkin olarak yararlanma olasılığının çevresel ve ekonomiklik gibi açılardan ortadan kalktığına haberini vermektedir. Bu gökdelenin tek avantajı klima sistemlerinde ve elektrik gücü temininde birlikte ısı ve güç sistemine sahip olmasıdır. Şekil 4 de özetlendiği üzere, 3 katlı bir klasik Londra evinde *brüt çatı alanının (BCA) toplam brüt döşeme alanına (BDA) oranı (CDO)* yaklaşık 1/3'dür. The Shard of Glass binasında bu oran yaklaşık 1/95'dir. Çatı alanının tamamına yıllık ortalama verimleri, η_{PV} %16 olan PV gözeler uygulansa bile ($A_{PV} \leq 100 \text{ m}^2$) (sıcak günlerde PV gözeler PVT sistemlerinde olduğu gibi soğutulmadığı için verim düşmektedir), ortalama çatı yüzeyine dik ışınım yoğunluğu, I_d 700 W/m² (0.7 kW/m²) olarak kabul edildiğinde, elde edilecek yıllık ortalama elektrik gücü yaklaşık 11 kW_e olur. Bu kapasite, binadaki tam kat adedi, n (zeminden itibaren yukarıya) sadece 3 olan bir ev için yeterli olabilir. Kare kesitli bir binanın her kat başına ortalama elektrik yükü Q_E değerinin güneş enerjisi ile *karşılama oranı (KO)* tasarım koşullarında Eşitlik (1-a) kullanılarak incelenebilir [14]. Bu eşitlikler-

deki eş-zamansızlık (diversite) çarpanı, DF ise kat adedi, bina tipolojisi, bina fonksiyonu, iklim yanı sıra mevsimlerle de değişebilen bir değerdedir. Eğer doğru (DC) akımın (DC) alması (AC) dönüştürülmesi gerekirse bir de evirici (inverter) gerekecektir.

$$KO = \frac{I_d \times A_{PV} \times \eta_{PV}}{(DF \times Q_E \times n)} \quad \{DC\} \quad (1-a)$$



Şekil 3. 95 Katlı the Shard of Glass Binası: Eski ve Yeni Mimarinin Çatışması [17]



Şekil 4. Tipik Bir Evde Güneş Enerjisinden Çatıda ve Düşey Duvarlarda Yararlanma Yüzeyleri



Bu durumda evirici verimi, η_{ev} de göz önünde tutulmalıdır (Eşitlik 1-b). Bu verim ortalama 0.95 dolayında yüksek bir değerde olsa da geleceğin binalarının tamamen veya kısmen doğru akımla çalışır olması da önem kazanmaktadır. Nitekim, Delft Teknik Üniversitesi kendi yerleşkesini doğru akıma dönüştürmektedir. Bu sayede tüm altyapı (sokak) aydınlatmalarında, binalarda, beyaz eşyada, tüm cihaz ve ofis aygıtlarında ve elektrikli araba şarj istasyonlarındaki eviriciler ve ilgili kayıplar ortadan kaldırılacaktır. Bu yöntemin diğer bir avantajı da eviricilerin düşük ışınım koşullarında (Yoğun bulutluluk, sabah ve akşama doğru gibi) ve çok fazla ışınım olduğunda DC akımı AC akıma evirirken alt ve üstten dalga kırpması yapmalarıdır (clipping). Bu ise günlük ve yıllık olarak elde edilen toplam elektrik enerjisinden ek bir kayıp anlamındadır.

$$KO = \frac{I_d \times A_{PV} \times \eta_{PV} \times \eta_{ev}}{(DF \times Q_E \times n)} \quad \{DC \rightarrow AC\} \quad (1-b)$$

Konut amaçlı tipik bir yapıda DF için Eşitlik 2 geliştirilmiştir. Tek katlı bir yapıda ($n=1$) DF 1 dir [14].

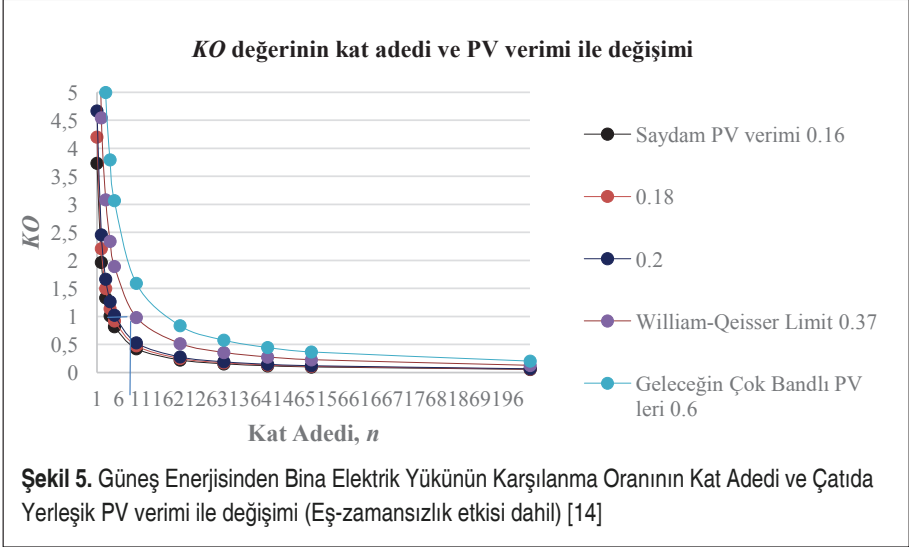
$$DF = 1 - (n-1)^m \times c \quad (2)$$

Örneğin, 7 katlı ve Q_E 3 kW/kat olan bir binadaki KO , Şekil 4'deki çatı boyutları (10 m x 10 m) kullanılarak ve m : 0,4 ve c : 0,05 kabulü ile, DF 0,897 olarak hesaplandı-ğında:

$$KO = \frac{0,7 \times 100 \times 0,16}{(0,897 \times 3 \times 7)} = 0,59 \text{ olarak bulunur.} \quad \{\text{Evirici kullanmayan DC tesisatı için}\}$$

Bu hesaplamada düşey duvarlardaki olası güneş enerjisinin ek PV panellerle hasadı göz ardı edilmiştir. Bu basit eşitlik bile önemli ipuçları vermektedir: her şeyden önce, karşılama oranı, KO binadaki kat adedi ile ters orantılıdır (Şekil 4). Şekil 4 de gösterilmemekle birlikte, KO değerinin bina elektrik yükü ile de ters orantılı olduğu Eşitlik 1-a'dan görülmektedir. Bu olgu ise binalarda doğal aydınlatmaya ve havalandırılmaya, ısıtma ve soğutmada pasif önlemlere, verimli cihazlara sahip düşük ekserjili binaların [18] önemine niceliksel olarak dikkat çekmektedir. Gene iklime bağlı olarak, I_d değeri arttıkça KO değeri için uygun en fazla kat adedi de sınırlı biçimde artar [14]. Şekil 5'e göre bir binanın elektrik güç talebinin-bugünün piyasasında mevcut PV göze verimlerine pek bağlantılı olmaksızın-tamamının karşılanabileceği ($KO=1$) en fazla kat adedi 5 tir. Yüksek binalarda cam yüzeylerde saydam/yarı saydam PV, duvarlarda ise PV gözeleri uygulanabilse de gömülü enerji ve diğer nedenlerden dolayı çevresel ve ekonomik olmamaktadır. Tek p-n bağlantılı PV gözelerin teorik üst verim sınırı yaklaşık 0,37'dir ve bu sınıra ulaşılmıştır. Bu koşulda bile en fazla kat adedi $KO=1$ koşulunu sağlamak için sadece 11'dir. Geleceğin çok katlı gözelerinde 0,6 verime ulaşıldığı gerçekleşse de kat adedi 19 olacaktır. Bir binanın sadece elektrik gücünün değil de ısı talebinin de düşey duvarlarda ve çatılarda (Bina ile Tümleşik: Building-

Integrated PVT, BIPVT) kısmen karşılandığı PVT sistemlerinin ek katma değeri ile bu çözüm bina zarfı cam olmayan yüksek binalarda yararlı olabilir. Soğuk iklimlerde üretilen ısı ekserjisi çok düşük olduğundan akışkan dolaşım pompasının (larının) ekserji talebi (Elektrik) daha fazla olduğu durumlarda ekserji farkına (Ekserji yıkımı) orantılı biçimde önlenebilir CO₂ salım sorumluluğu doğar.



Bu da iklimsel bölgelerin ve güneşlenme koşullarının PV veya PVT seçeneklerinde önemli bir karar verme parametresi olduğunu gösterir. Aynı çatı alanında PVT (Photo-Voltaic-Thermal) kullanılırsa bu kez PV modüller soğutulmuş olduğundan bugünün ortalama PV verimi %18 e çıkabilir ve soğutma suyundan da ısı elde edilebilir. Sonuç olarak, Şekil 4'e ilişkin örnekte PVT panelleri kullanılırsa, toplam kapasite 12,6 kWe güç ve 28 kW_{th} ısı (50 °C) olur ki bu çözüm aynı yapı için daha elverişlidir [19]. Ancak PVT panel sisteminde en uygun bir işletim öngörüldüğünde en fazla 50 °C sıcaklıkta su üretilebildiği için açık devreli bir sistemde (Kullanım suyu gibi) bu suyun ek bir enerji tüketimi ile en az 60°C a ısıtılması gerekir. Aksi durumda açık devreli sistemlerde Lejyoner hasatlığı riski artar. PVT paneller daha ağır oldukları için çatı statüsünde de düzenlemeler gerekebilir. Yapının dış cephesine ek PV veya tercihan PVT modüller de konulabilir. Şekil 5'de görüldüğü üzere, PV verimlerinde büyük artışlar olmadığı sürece bir binanın elektrik gücünün tamamının karşılanması için en fazla kat adedi 5 dolayındadır. Bu sayıyı arttırmak için günümüzde elektrik güç talebinin azaltılması, az da olsa pik yükleri düzlemek üzere enerji depolaması düşünülebilir. Bu konuda Tesla Şirketinin ev tipi bataryaları (Power Wall) piyasaya çıkmıştır fakat çok pahalıdır. Bu tür bir 13,5 kW-h kapasiteli batarya yaklaşık 65000 TL dir (Vergi ve montaj hariç) [20]. Özellikle düşey yüzeylerde güneş enerjisinden etkin yararlanma



için o yörenin enlemine dolayısı ile, Zenit açısının ortalama değerine göre cepheye gelen ışınımın iyi hesaplanması ve yıl boyunca saatlik gölgelemelerin de aynı şekilde benzetim yolu ile çözümlenip değerlendirilmesi gerekir. Şekil 6 bu tür bir benzetim örneğini vermektedir. Gene bu konular güneş enerjisinin etkin ve akılcı kullanımında iklimsel koşullar kadar yörenin de önemli olduğuna işaret etmektedir. Alçak bir evin çok yüksek binaların hemen dibinde bulunduğu düşünülürse gölgelemeden çok etkileneceği açıktır. Gölgelemenin günün saatlerine ve mevsime göre etkileri sayısal yöntemlerle incelenmelidir. Yüksek binalar yoğunlaştıkça birbirlerini gölgeleme olasılıkları da artmaktadır. Bazı binalar kendi geometrilerine bağlı olarak kendi cephelerini de gölgeleyebilmektedirler. Bu sorunlar İstanbul ve Ankara da yaşanmaktadır. Şekil 7 de yüksek binaların çevrelerini gölgeledikleri gibi kümeleştikleri alanlarda birbirlerini de gölgeledikleri görülmektedir. Sık ve yüksek kentleşme, gölgeleme sorunu oluşturmanın yanında bırakın bölge ısıtma ve enerji sistemlerine yeterli alan bırakmayı, afet durumlarında toplanma yerlerini bile giderek çok azaltmaktadır (Şekil 8). Son verilere göre İstanbul kentinde afet toplanma alanları son yıllarda %84 azalmıştır. Bu denli yoğunlaşma ve dikey gelişim sadece güneş enerjisine değil diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına ve sistemlerine de uygulanabilecek serbest alan bırakmamaktadır.



Şekil 6. Örnek Bir Bina Gölgeleme Çözümü [21]

Yüksek binaların derin temel betonları içerisine ısı değişim boruları konularak ısı pompaları kullanılarak ısıtma ve soğutma yapılacağı öne sürülse de enerji kalitesinin (Ekserji) akılcı kullanılması için ısı pompasının minimum etkinlik katsayısı COP_{min} değerinin en az 8 olması gerekir [22, 23]. Bunun nedeni ısı pompasından talep edilen ısı veya soğukun birim ekserjisi, ε_{talep} in en fazla 0,12 kW/kW dolayında olmasına karşın tükettiği elektrik gücünün birim ekserjisi, ε_{arz} in 0,95 kW/kW olmasıdır.

$$COP_{min} \geq \frac{\varepsilon_{arz}}{\varepsilon_{talep}} = \frac{1}{\psi_R} = \frac{0,95}{0,12} = 7,9 \quad (3)$$

Bu eşitlik elektrik enerjisinin ısı pompasında COP 7,9 olsa bile enerji kalitesinin ne oranda akılcı kullanıldığını da göstermektedir. Bu kırım noktasında akılcılık oranı,

ψ_R 0,126 dır (1/7,9). Bu oran REMM Modeli çerçevesinde geliştirilmiştir [16]. Geri kalan enerji kalitesi (ekserji) katma değere dönüşmeden yıkılmakta ve bu oranda önlenemez, ΔCO_2 salımından sorumlu olunmaktadır [24]:

$$\Delta CO_2 = 0,27 \varepsilon_{arz} (1 - \psi_R) = 0,256 (1 - \psi_R) = 0,224 \text{ kg } CO_2 / \text{kW} \cdot \text{h}_{\text{ısı}}$$

$$\{ \psi_R < 1, \varepsilon_{arz} = 0,95 \text{ kW/kW} \} \quad (4)$$

Bu hesaba elektrik enerjisinin yakıttan-prize üretimindeki salımlar dahil değildir. Elektrik enerjisinin çatı ve bina cephelerindeki PV gözelerden elde edilmesi de özellikle yüksek binalar için gerçekçi değildir. Kaldı ki PV gözelerin de ψ_R değeri 0,6'dan fazla değildir, çünkü PVT panellerde olduğu gibi ısı üretmezler (Birlikte ısı ve güç). PVT panellerde ise bu değer 0,8'e kadar çıkarsa da ne yapılsa yapılsın, önlenemez CO_2 değeri sıfıra ulaşmaz [25]. İstanbul gibi kentlerde toprak kaynaklı ısı pompalarının ısı değiştirici ve mevsimlik ısı depolama hacimlerine yer kalmamıştır.



Şekil 7. İstanbul'da Yoğun ve Yüksek Kentleşmenin Son Durumu [26]. Haber Türk 2 Eylül 2017



Şekil 8. İstanbul'un Afet Toplanma Alanları [26]



2. YÜKSEK KATLIYOĞUN KENTLEŞMEDE GÜNEŞ ENERJİSİ VE HUKUK

Çatısında usulüne uygun PV panelleri bulunan alçak bir binanın hemen yanına bir gökdelen yapıldığında gölgelemenin etkisi ile güneşten elde edilen elektrik gücünün azalmasından doğan zarar nasıl karşılanacaktır? Veya zaten az bir çatı alanına sahip bir yüksek binada bu çatı alanı nasıl ve kimler tarafından paylaşılacaktır? Kat Mülkiyeti Yasasının 19. maddesi hükmüne göre kat maliklerinden her biri ana taşınmazın mimari durumunu titizlikle korumaya mecburdur ve tüm kat maliklerinin rızası olmadıkça ana taşınmazın ortak yerlerinde onarım, tesis ve değişiklikler yaptırılamaz. Ana binanın mimari projesinde öngörülmüş olmasa bile yönetim planında açıkça yasaklanmamış olduğu takdirde ana binaya ve diğer kat maliklerine zarar vermemek ve onu tesis eden malikin arsa payı oranını geçmemek koşullarıyla güneş enerjisi ile ısıtma sistemleri kurulabilir (18. HD. 12.11.1992, 9553/11126). Yasadaki temel amaç toplumun ortak kullanımı ve ortak inisiyatifinin ön plana çıkarılmasıdır. Dolayısı ile bireylerin değil binanın ortak kullanımı önem kazanmaktadır. Ancak Şekil 5'den görüldüğü üzere 5 katın üzerindeki binalarda ya her daireye yeterinden az güç sağlanacak ya da sadece bazı daireler yararlanacaktır. Yasaya ve genel teamüllere göre paylaşımcı toplum gözetildiğinde bireysel yararlanma yerine bölgesel yararlanma ön plana çıkmaktadır. Yasanın 641. Maddesi kapsamında değerlendirilebilecek bu olgu tek tek binalar yerine ortak kullanımlı ve paylaşımlı bölge enerji sistemlerine yöneltilmesinin kaçınılmazlığını ortaya koymaktadır [27].

Bölge enerji sistemlerine geçilmesi ile bireysel anlamda binalarda güneşten hasat edilen elektrik gücü ve sıcak suyun paylaşımına ve akılcılığına büyük ölçüde katkıda bulunacak olan yenilenebilir enerji ağırlıklı ısı ve güç santralleri de gündeme gelecektir. Bu santrallerin kapasite büyüklüğü ve merkezi işletim, bakım ve onarım avantajlarına bağlı olarak daha verimli olmalarından da önemlisi, kentin biyogaz, rüzgâr ve büyük olasılıkla jeotermal -ve kesinlikle toprak ısısından- yararlanmak ve merkezi ısı depoları kullanılarak yaygın kentlerde daha geniş bir alanda oluşan eşzamansızlık bandında tepe yüklerin daha etkin düzleştirilmesi mümkün olacaktır. Çok yüksek binaların çok yoğun olmaması ön koşulu ile, bireysel binaların gölgeleme sorununun da geniş bir bölgeye yayılması söz konusu olacağından bu sorun bir ölçüde kendiliğinden çözülmüş olacaktır.

3. CAM CEPHELİ YÜKSEK BİNALARIN SORUNLARI (CAM KAFES KULELER)

Schittich ve diğerleri, giderek kuleleşen cam binaları çok öz bir şekilde betimlemişlerdir: Bu bağlamda çok yüksek binaların, hele cam kafesli binaların herhangi bir enerji ve çevre yararı bulunmamaktadır.

“Towering, glazed office blocks became fashionable as company headquarters...”

Glass curtain walls became the status symbol of confident companies and the silhouette of glass towers the sign of a prosperous city.”
Schittich ve diğerleri, 2007.

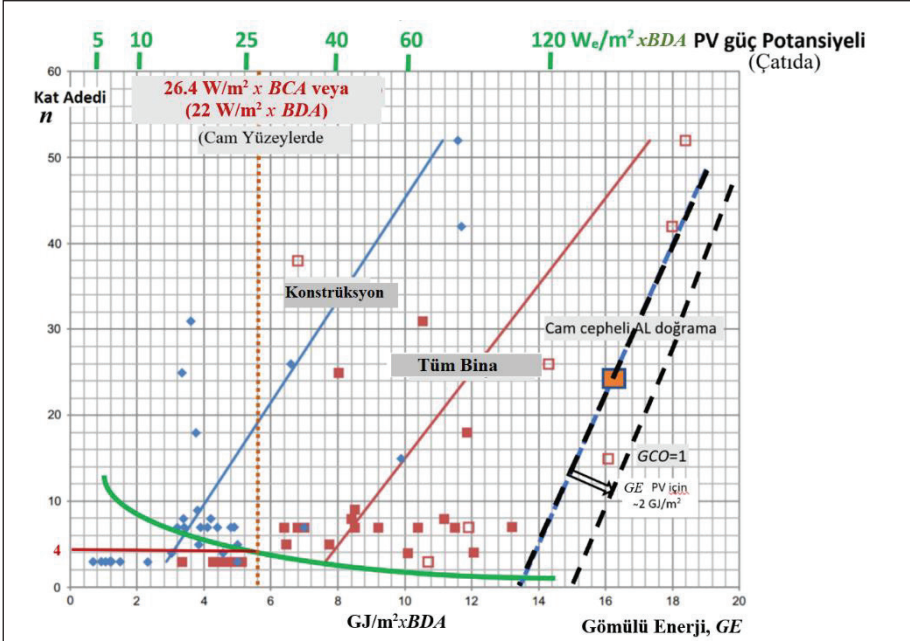
3.1 Yüksek Binalarda Gömülü Enerji (Embodied Energy)

Binaların yapımında, ham malzemenin uygulama kademesine ve fonksiyon kazandırılmasına (tuğla gibi) ilişkin enerji tüketimlerine gömülü enerji denilmekte ve bu faaliyetlerden oluşan salımlar da gömülü CO₂ salımı olarak tanımlanmaktadır. Halbuki, genelde maliyet analizleri, yatırımın ve işletmenin geri dönüşleri ve yaşam boyu çözümlerler parasal tabanda yapılmakta ve çoğu kez özellikle çevresel anlamda yanlış sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Gömülü enerjiden daha da önemli olan gömülü ekserji konusuna ise hemen hiç kimse değeri vermemektedir. Bu çalışmada gömülü enerji ve ekserji hesaplarına ve bu iki olguya bağlı toplam gömülü CO₂ tahminlerine öncelik verilmiştir. Bu bağlamda, ekonomik çözümlerler bu çalışmada yer almamaktadır. Şekil 9’da kat adedinin artması ile gömülü enerjinin de doğrusal bir biçimde arttığı görülmektedir. En soldaki çizgi sadece yapı çatkısı (Structure) ile ilintili gömülü enerjiyi temsil etmektedir [14]. Sağa doğru ikinci çizgi ise binanın tamamına (Whole Building) ilişkin gömülü enerjiyi temsil etmektedir [14]. Cam cepheli yüksek binalarda ise günümüzde alüminyum doğrama ve renklendirilmiş özel cam paneller kullanılmaktadır. Bu çalışmada, her iki malzemenin birim gömülü enerjileri kullanılarak (Çizelge 3), Şekil 9’a yüksek ve cam kaplı binalar için üçüncü bir (kesikli) çizgi eklenmiştir. Bu yeni çizgi diğer alışılmış bina malzemelerine oranla aynı kat adedi değerleri için yaklaşık 2 kat daha fazla gömülü enerji saklamaktadır (Örneğin 30 katlı bir bina çatkısı yerine cam cepheli, alüminyum doğramalı sistem kullanıldığında *Gömülü Enerji (GE)* değerleri sırası ile 7,5 ve 16,5 GJ/m² BDA olmaktadır). Tek fark bu çizginin diğer çizgilere oranla kat adedine biraz daha az bağımlı olmasıdır. Bu çizgiye daha PV gözelerin gömülü enerjisi eklenmemiştir. Bu gömülü enerji kat adedinden yaklaşık olarak bağımsızdır (Bina yüksek oldukça rüzgâr hızı artıp hava sıcaklığı biraz azalarak üst katlara doğru PV verimi az da olsa yükselebilir). Ancak unutulmamalıdır ki saydam/yarı saydam PV gözelerin verimi şu an en fazla 0,08’dir. Düşey cam yüzeylerle tümleşik saydam/yarı saydam PV gözelerine dik ve yıllık ortalama olarak (Gölgelenme dahil) 280 W/m² ışınım yoğunluğu geldiğinde yaklaşık ve kat adedinden oldukça bağımsız bir PV güç potansiyeli hesaplanabilir. Bu değer 22 W/m² x BDA olarak bulunmuş ve üstteki skalaya göre 26,4 W/m² x BCA olarak Şekil 9’a işlenmiştir. Sonuç olarak, Şekil 9’un en sağındaki kesikli çizgi alüminyum doğramalı cam cepheli bir binanın cephesine saydam/yarı saydam PV katmanları yerleştirildikten sonraki toplam gömülü enerjiyi temsil etmektedir. Bugünkü PV gözelerinin birim yüzey alanına ilişkin gömülü enerjisi, *GE* 600 kW-h/m² (Ham madde işlemleri hariç) kadardır. Birim PV yüzey alanının birim döşeme alanına evrilmesi için kare geometri bir binada iki komşu cephesine PV yerleştirildiği varsayılmıştır. Sonuç olarak, yaklaşık



2 BDA ($2,4 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}$) kadar bir ek gömülü enerji oluşmaktadır [14]. Daha güncel bir çalışmada bu değerin giderek azaldığı görülmüştür. Örneğin, bugünün silikon kristalin PV gözelerinde GE değeri 250 kW-h/m^2 dolayındadır [28, 29]. $26,4 \text{ W/m}^2 \times \text{BCA}$ değeri $2,4 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}$ değerindeki gömülü PV enerjisi ile karşılaştırıldığında ve yıllık güneşlenme süresi, S değeri 2500 saat olursa ek gömülü enerjinin geri ödeyebileceği yıl, Y hesaplanabilir:

$$Y = \frac{2,4 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}}{\left(0,0036 \text{ kW-h/GJ} \times \frac{26,4}{1000} \text{ kW/m}^2 \times \text{BCA} \times 2500 \text{ h/yıl}\right)} = 10 \text{ yıl}$$



Şekil 9. Alışılmış Malzemeden Üretilmiş Bir Yapı Çatısına ve Bir Binanın Tamamına İlişkin Gömülü Enerjinin [11] Cam Cepheli Ve Alüminyum Doğramalı Cephe İle Karşılaştırması

Not: Brüt Döşeme alanı (BDA) ile brüt cephe yüzey alanı (BCA) oranı yaklaşık 0,80 alındığında (3 m, brüt kat yüksekliği olan kare tabanlı bir bina için) yatay eksenin BDA değerleri yaklaşık 1,2 ile çarpılırsa birim brüt cephe alanındaki enerji bulunur.

Bu sonuç mantıklı bir enerji geri ödeme süresi olarak gözükse de saydam/yarısaydam PV gözelerin monte edilebilmesi için cam cepheli yüksek binalarda kullanılan cam ve alüminyum malzemenin çok uzun enerji geri ödeme sürelerine sahip oluşları da hesaba katıldığında kabul edilemez süreler ortaya çıkar (>75 yıl). Sorun PV gözelerden

çok cam ve alüminyum malzemededir. Bu bağlamda cam ve alüminyum üretim teknolojileri geliştirilmelidir. Alışılmalayan PV panellerin dış cepheye monte edilmesinde ise sadece PV gözelerle ilişkin enerji geri dönüş süresi beş yıla kadar inebilmektedir. Ancak bina çatkısının gömülü enerjisi göz önünde bulundurulacaksa Şekil 9'dan kat adedine göre bu enerji de okunmalıdır. Örneğın, oldukça yüksek ama alışılmış malzeme ile inşa edilmiş bir binada ($n=30$) cam ve alüminyum yerine alışılmış çatkı teknolojisi kullanılmakta olduğu varsayılısın. Şekil 9'dan $GE: 7.7 \text{ GJ/m}^2 \text{ BDA}$ ($9,24 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}$) olarak okunur. Bu değere $2,4 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}$ da eklenmelidir:

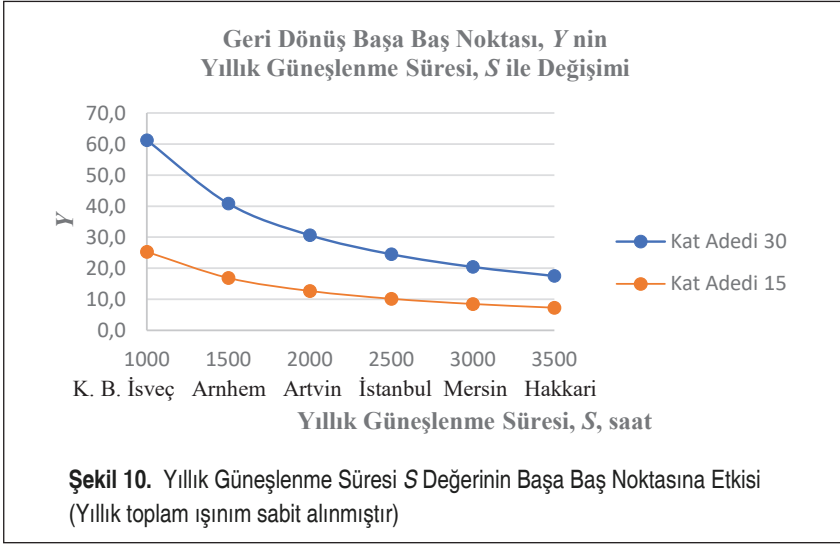
$GE = (9,24 \text{ GJ/m}^2 + 2,4 \text{ GJ/m}^2) \times \text{BCA} = 11,64 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}$ (PV gözeler ve bina çatkısı). Bu kez saydam/yarısaydam PV göze yerine alışılmış PV paneller kullanıldığından ($\eta_{PV} = 0,16, 52,8 \text{ W/m}^2 \text{ BCA}$) Y , diğer bir deyişle başa baş noktası, bina çatkısının gömülü enerjisi dahil olmak üzere 24,5 yıl olarak bulunur:

$$Y = \frac{11,64 \text{ GJ/m}^2 \times \text{BCA}}{\left(0,0036 \text{ kW-h/GJ} \times \frac{52,8}{1000} \text{ kW/m}^2 \times \text{BCA} \times 2500 \text{ h/yıl}\right)} = 24,5 \text{ yıl}$$

Şekil 9'a eklenen en son ilişki ise çatıya monteli güneş enerjisi sisteminin bina kat adedi ile değışimidir. Bu ilişki diyagramın en altındaki eğri ile ve en üstteki yatay skala üzerinde verilmiştir. Örneğın, tek katlı bir yapının çatısına kurulacak PV sistemi $120 \text{ W/m}^2 \text{ BDA}$ ya çok yakın bir kapasite sağlayabilirken aynı bina yukarı doğru 10 kata uzatıldığında bu kapasite $9 \text{ W/m}^2 \text{ BDA}$ ya kadar inebilmektedir. Bu eğriden çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise cam cepheli bir binanın kapasitesinin bu eğri ile 4. katta buluşmasıdır. Bu ise cam kaplı bir binanın güneşten elektrik üretiminde yeterli olabilmesinin dört katla sınırlı olması anlamındadır. Y değerinin güneşlenme süresi, S ye, dolayısı ile ülkeye, iklim ve çevreye bağıllığı bazı örnek kentler için Çizelge 1'de kat adedi (n) 30 ve 15 için verilmiş, ayrıca Şekil 10 da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kat adedi azaldıkça geri dönüş süresi azalmaktadır.

Çizelge 1. Bazı İl ve Ülkelerde Gömülü Enerjinin Geri Ödeme Süreleri [14]

Bölge/İl	S saat	$n = 30$	$n = 15$
		Y (Yıl)	
K. B. İsveç	1000	61,2	25,3
Arnhem, Hollanda	1500	40,8	16,8
Artvin	2000	30,6	12,6
İstanbul	2500	24,5	10,1
Mersin	3000	20,4	8,4
Hakkâri	3500	17,5	7,2



Aslında, bir yüksek binada her cepheye hatta her kata Saydam/Yarı saydam PV gözelerinin uygulanması gerekmez. Bu durumda her cephesi cam olan bir binada PV kaplı cam yüzeylerin toplam cam yüzeyine oranı (GCO , Güneş Paneli Kaplı Cam oranı) değerinin de gömülü enerji hesabına katılması gerekir. Tamamı cam kaplı ve Alüminyum doğramalı, 40 katlı bir binanın güneş alan yüzey oranı toplam dört yüzeyin %40 ı olduğu düşünülürse, $GCO = 0,4$ olur ve:

PV gözelerine ilişkin gömülü enerji, $GE_{PV} = 2,4 \text{ GJ/m}^2 (BCA) \times GCO = 0,96 \text{ GJ/m}^2 (BCA)$ olarak değişir.

Eğer birim dikey cephe yüzeyine gelen yıllık ışınım yoğunluğu, I_{yd} olarak hesaplanmış ise Şekil 7'den GCO kullanılarak gömülü enerjinin kaç yılda (Y) karşılanabileceği daha hassas bir biçimde Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanabilir. η_{PV} ise yarı saydam pencere ile tümleşik PV gözünün elektrik gücü üretim verimidir.

$$Y = \frac{GE}{(I_{yd} \times \eta_{PV} \times GCO)} \quad (5)$$

$$\text{Burada [30], } I_{yd} = [z \tan \theta_z + (1-z)]I_{yy} \quad (6)$$

z ölçülen toplam ışınım yoğunluğu içerisindeki doğrudan ışınım yoğunluğuna oranıdır. Zenit açısı, θ_z ise bu çalışmada mukayeseler için kuzey yarım kürede geçerli olmak üzere, yaklaşık biçimde enlem açısı θ_L ile ilişkilendirilmiştir.

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \theta_L) \quad (7)$$

Ankara için I_{yy} : 50,1 kW-h/m²-yıl [11], θ_L : 40° Kuzey, η_{PV} : 0,08, z : 0,7 (kabul), ve belirli bir bina için GCO 0,5 (kabul) ise, $\theta_z = 50^\circ$, ve örneğin, 30 katlı bir cam-kafes binanın GE değeri Şekil 9'den hesaplandığında Eşitlik 5 anlamsız bir değer verir:

$GE = 16,8 \text{ GJ/m}^2 + 2,4 \times 0,5 \text{ GJ/m}^2 = 18 \text{ GJ/m}^2$ BCA ise Eşitlik 5'den:

$$Y = \frac{18}{(0,20 \times 0,08 \times 0,5)} = 2250 \text{ yıl} \gg 50 \text{ yıl}$$

Bu sonuç 5 katın üzerindeki cam binaların PV kaplansa da gömülü enerjisi, bırakın 50 yıllık bina ömrü sonunda, yatırımı hiçbir zaman geri ödeyemeyeceğini kanıtlamaktadır. Bunun yerine $n = 30$ katlı bir beton yapı olsa:

$$Y = \frac{7,2 + 2,4 \times 0,5}{(0,20 \times 0,16 \times 0,5)} = 480 \text{ yıl} \gg 50 \text{ yıl}$$

Bu çarpıcı sonuçlar PV gözelerinin yüksek binalardaki gömülü enerjisi ödeyemeyeceğini belirtmektedir. O halde, probleme aksi yönden bakarak acaba 50 yılda ne kadarının geri ödeneceği sorgulanmalıdır.

$$Y = \frac{(2,5 + 2,4 \times 0,5) \times x(\%)}{(0,20 \times 0,16 \times 0,5)} = 50 \text{ yıl} \times 100 \quad \{\text{Yüzde olarak}\} \quad (8)$$

Yukarıdaki örnek için ($n = 30$) $x = \%9,5$ olarak bulunur. Diğer bir deyişle, tüm cephelerin yarısı PV kaplı bu bina tasarım ömrü olan 50 yıl sonunda gömülü enerji tüketiminin ancak yüzde 9,5 unu karşılayabilecektir. Bu değer hesabında basitlik adına PV gözelerin ömürlerinin de bina ömrüne eşit olduğu varsayılmaktadır. Halbuki bu varsayım geçerli bile olsa PV verimleri yıllar geçtikçe azalmaktadır. Ayrıca bakım ve tamir-bozulanları değiştirme masrafları dahil edilmemiştir. Genelde, piyasadaki garanti süresi bu süre sonunda PV veriminin %80 ini koruyacağı koşulu ile 20 yıldır. Demek ki, 50 yıl içerisinde yaklaşık bir kez PV sistemin bütünü ile değiştirileceği beklenmelidir. Yeni nesil PV sistemlerinin verimlerinin daha yüksek olacağı da öngörülmelidir. Tüm bu etkenler de göz önüne alındığında yukarıdaki hesabın geçerli olacağı kolaylıkla savunulabilir. Yukarıdaki hesap değişik katlar için tekrarlanmış ve sonuçlar Çizelge 2 de gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre, tek katlı bir binada (Çatı hariç) düşey duvarlardaki PV paneller 50 yıl sonunda -PV panellerin de dahil olmak üzere- bina çatısının gömülü enerjisinin yaklaşık $\frac{1}{4}$ ünü karşılayabilmektedir. Bu oran yukarıda da hesaplandığı gibi 30 katlı bir bina için sadece 1/10 dur. Aslında çevre bilinci açısından tüm PV uygulamaları geçerli ancak sadece bazıları akılcıdır. Çevreciler çünkü cam veya beton cephelerde PV uygulamalar hiç yapılmaz ise x değeri 0 olur. Bunun anlamı böyle bir bina yatırımının hiç geri dönüşü olmayacaktır. PV ve PVT sistemlerin uygulamalarında akılcılık sınırı bu çizelgeye göre 10 katlı bina dolayındadır. Çizelge 3 de ise bazı bina malzemelerinin gömülü enerji yanı sıra gö-



mülü ekserji değerleri de verilmiştir. Kullanılan enerjinin niceliğine (Birinci Yasa) ve niteliğine (İkinci Yasa) bağlı olarak gömülü CO₂ değerleri de ayrı ayrı hesaplanmıştır (Çizelgenin açıklamalarına bakınız). Alüminyumun gömülü ekserjiye bağlı CO₂ salımı enerjiye bağlı gömülü CO₂ salımının yaklaşık 1,5 katı iken bu oran cam için 0,23 tür. Bu oranların değişik olması üretim süreçleri ile ilgilidir. Gömülü ekserjiye bağlı CO₂ salımları (5 sayılı sütun) ekserji yıkımlarının ağırlıklı bir sonucu olduğundan bu salımların enerjinin niteliğine (Tüketim) bağlı salımlarla (3 sayılı sütun) toplanması düşünülebilir. Çizelgeden görüldüğü üzere en yoğun CO₂ salımı ve en fazla gömülü enerji ve ekserji kullanımı alüminyum da gerçekleşmekte, onu da cam takip etmektedir. Bu bağlamda, beton en az salıma ve enerji tüketimine ve ekserji yıkımına sahiptir.

Çizelge 2. Kat Adedi ile x ilişkisi

n Bina Kat Adedi	$GE, GJ/m^2$ (Sadece bina konstrüksiyonu)	x $PV + PVT$ ile %	x Sadece %
1	3,4	23,5	0
5	4,5	17,8	0
10	5,2	15,3	0
15	6,2	12,9	0
20	6,7	11,9	0
25	7,9	10,1	0
30	7,7	9,5	0

3.2 Saydam ve Yarı Saydam PV Gözeler

Bu tür PV panellerin iç mekânı 2°C kadar ısıttıkları bilinmektedir (Şekil 11) [31]. Bu nedenle klima yükleri artmaktadır. Düşük PV gözelerin verimleri de 0,08'i aşmamaktadır. Bu nedenle ek klima yüklerini karşılamakta zorlanmaktadırlar. Renklendirilmiş cam ve PV paneller yazın gölgeleme etkisi yapsa da yapay aydınlatma yükünü kış aylarında arttırabilmektedir. Şekil 12'de görüldüğü üzere, bazı PV türleri net enerji dengesi (*NEB*) olarak eksi, bazıları ise artı değerler taşımakta ve bu ilişkiler doğal olarak pencere duvar oranına bağlı kalmaktadır.

Cam-kafes binalarda bu değer yüzde olarak 100 dür. Bu araştırma dahil olmak üzere konu tam açıklığa kavuşmamıştır ve birbiri ile çelişen araştırma sonuçları literatürde oldukça fazladır. Bu arada PV ve PVT karşılaştırması yapan araştırmalarda PVT panel sistemin avantajları ortaya çıkmıştır [22]. Son yıllarda ise çatı kiremidi tipinde ürünler piyasaya çıkarılmıştır [34]. Şekil 13 de gösterilen ürün, ömür-boyu maliyet açısından normal kiremitten bile daha ucuza gelebiliyor şeklinde tanıtılmakla birlikte gömülü enerji ve gömülü ekserji geri ödemesi söz konusu edilmemektedir. Ayrıca verim %2 puan daha azdır.

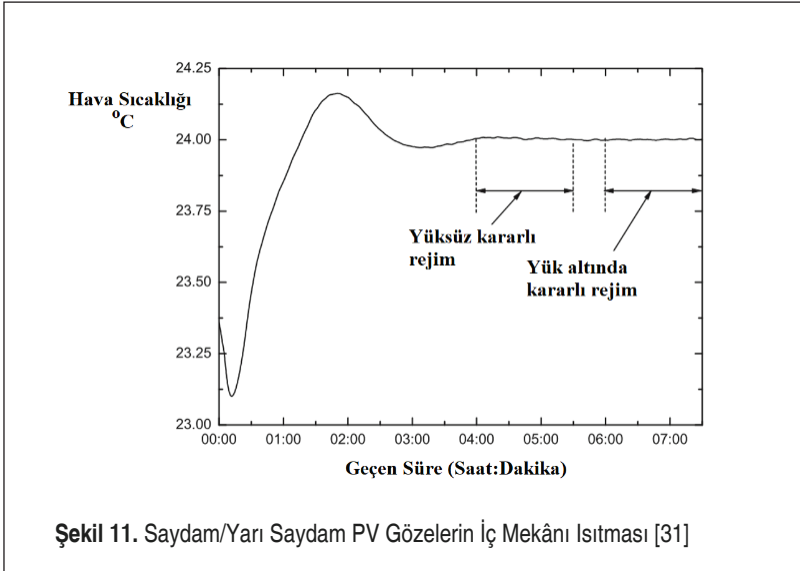
Çizelge 3. Bazı Yapı Malzemelerinin Gömülü Enerji, Gömülü Ekserji ve Gömülü CO₂ Değerleri

Malzeme	Gömülü				Toplam Salım 3+5
	Enerji, GE (Nicelik) GJ/ton*	CO ₂ ton/ton	Ekserji, GEX (Nitelik) GEX GJ/ton	CO ₂ ton/ton	
1	2	3	4	5	6
Alüminyum	170	31,5**	249***	53,6****	85,1
Cam (Float, Renkli)	105	19,4	21	4,5	23,9
İnşaat Demiri	40	7,4	47	10,1	17,5
Sunta	25	4,6	5 (Tahmini)	1,1	5,7
Tuğla	8	1,5	2,7	0,6	2,1
Beton	5	0,9	1,3	0,28	1,18

* Malzeme yoğunlukları ve birim metre-kare duvar yüzeyi içinde kullanılan malzeme hacmi ve kütleli yoğunlukları hesaba katılarak yukarıdaki değerler GJ/m² olarak da hesaplanmıştır [27].

**Doğal Gazlı termik santral tabanında: $(GE/0,0036xc/\eta_p)/1000$. Örnek: alüminyum için, $170/0,0036x0,2/0,3 = 31,5$ ton/ton. Burada, c doğal gazın kg CO₂/kW-h cinsinden içeriği, 0,3 Elektrik enerjisinin üretim, dağıtım ve depolama kayıplarına ilişkin toplam verimi (AB ortalaması), 0,0036 çarpanı kW-h ile GJ arasındaki dönüşüm katsayısıdır.

[28]. * Önlenebilir CO₂ salımı (Ekserji tabanlı): $(GEX/(0,87x0,0036x1000))x(c/\eta_p)$. 0,87 doğal gazın birim ekserjisidir (kW/kW) [17].





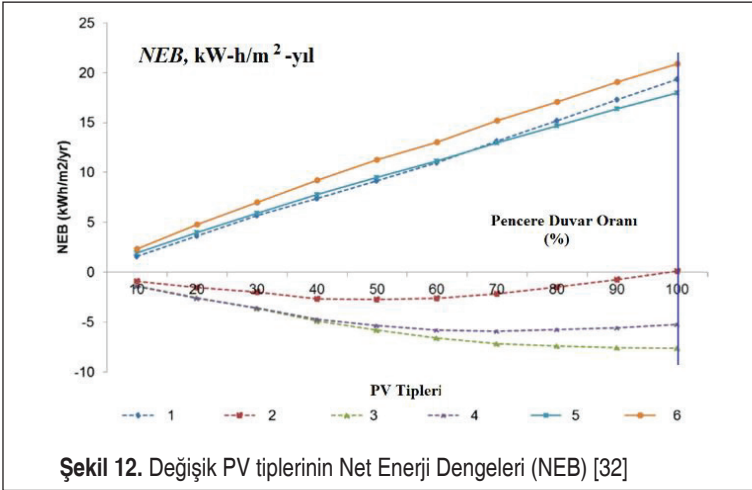
3.3 PV Gözelerin Kendi Gömülü Enerji Geri Ödeme Süreleri

Aslında, PV gözelerin Enerji Geri Ödeme Süreleri, Y iklime, PV panellerin binadaki konumlarına, yataydan olan açılara, dış sıcaklığa, rüzgâr şiddetine, hâkim rüzgâr yönüne, bina yüksekliğine ve bina konumunun enlemine gibi değişik faktörlere bağlıdır. Bu nedenle saatlik hatta dakikalık verilerle hesap yapılmalıdır. 1 m^2 alana sahip bir panelin yıl boyunca üretebildiği enerji $YEÜ$ ise o panelin gömülü enerjisine bakılarak Y daha hassas hesaplanabilir [34].

3.4 Yüksek Binalarda Enerji Tüketimi

Yüksek binalarda enerji gereksinimini etkileyen ana faktörler, bina mimarisi, boyutsal ilişkiler, bina geometrisi, bina yönü, doğal ve iklimsel koşullar, kullanıcı (insan) faktörü, yapım teknolojisi ve bina zarfıdır. Örneğin, cam cepheli bir binanın gömülü enerjisi diğer bina zarfı teknolojilerine oranla kat adedi ile daha çok artmaktadır.

$$Y = \frac{GE}{YEÜ} \quad (9)$$

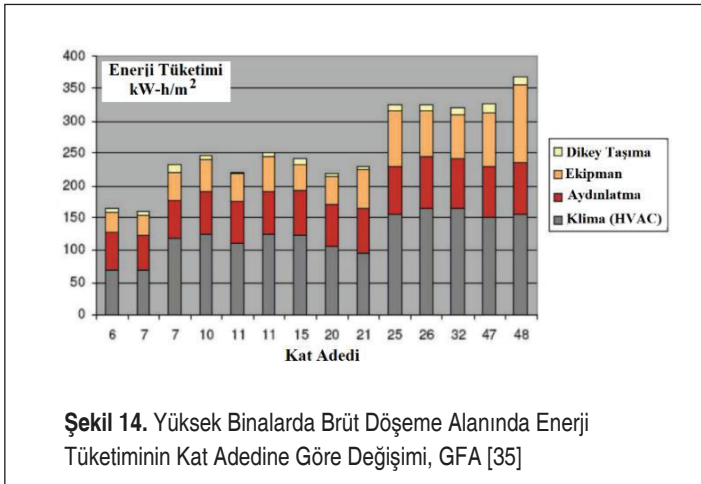


Şekil 13. Güneş Kiremidi [33]

Kat adedi ile ısı birlikte hava sızımı kayıp/kazançları artmaktadır. Bina yükseldikçe dış hava da soğumaktadır. Kışın ısı kayıpları artmakta yazın ise ısı kazançları azalmaktadır. Yıllık net etki binanın maruz kaldığı koşullara bağlıdır. Hong Kong da 25 binada yapılan araştırma sonuçları Şekil 14 de gösterilmektedir [35]. Önceki bölümlerde görüldüğü gibi kat adedi ile güneş enerjisinden yararlanma olanağı azalmasına karşın bina yükleri de tam tersine artmaktadır.

3.5 İnşaat Sırasında Malzemenin Dikey Taşınması

Gömülü enerji hesaplarına inşaat sırasında malzemenin n katlı bir binada ortalama $n/2$ kata dikey taşınması da göz önünde bulundurulmalıdır: 1 ton malzemeyi yukarı çıkarmak için potansiyel enerji, PE : $1000 \text{ kg} \times n/2 \times 3 \text{ m}$ (binanın kat yüksekliğinin yarısı): $1500n$: $1500 \times 9,80665/1000 \times n$: $14,7 \times n \text{ kJ/ton}$. 100 katlı bir binada toplam gömülü potansiyel enerji $1,47 \text{ MJ/ton}$ a ulaşır. İşletme sırasında gene asansörlerin tükettiği enerji önemli boyuttadır (Şekil 14). Kullanım suyunun (Sıcak ve soğuk) dolaşımında kullanım açık devreli olduğu için pompa giderleri de kat adedi yani basma yüksekliği ile orantılıdır. Bir patentte ise aşağıya akan kullanılmış sulardan elektrik üretimi konu edilmiştir. Ancak bunun ne kadar yararlı olacağı bilinmemektedir. Ara kat tesisat istasyonları, dikey havalandırma ve klima kanalları (sonuçta atmosfere açık) yangın emniyeti daha pahalı ve pencereler açılmadığı için yapay havalandırma yükleri ve klima yükleri de daha fazladır. Literatürde cam kafes binaların ne denli olumsuz olabilecekleri belirtilmiş ve aynı zamanda bu algıyı giderebilmek için yüksek katlardaki atık suyun potansiyel enerjisinden elektrik üretimini düşünenler bile olmuştur ki bu gibi düşünceler akılcı ekserji yönetiminde anlamsızdır. [36, 37].





4. ENUYGUN KENTLEŞME MODELİ

Sonuç olarak, yüksek binalar güneş enerjisinden yararlanmaya değişik güçlükler getirmenin yanı sıra, yüksek enerji tüketimleri nedeni ile tercih konusu olmamalıdır. Bu olgu tüm yenilenebilir enerji kaynakları ve sürdürülebilir enerji sistemleri için de özellikle arazi-yoğun kentlerde geçerlidir. Bu nedenle, açık alanlar ve yaygın yerleşim bölgeleri oluşturarak yenilenebilir enerji kaynaklarından merkezi santrallerde daha etkin ve verimli yararlanılmalıdır. Ancak, kentleşme çok yaygınlaşırsa bu kez bölge enerji sistemlerinin -her ne kadar daha verimli bir sistemse de- binalardan uzaklaşması ve bölge ağ yapısının uzaması nedeni ile mesafeler ve buna bağlı CO₂ salımları artmaya başlar. Öte yandan, yavaş kentler, net-sıfır enerjili kentler, 5. nesil bölge enerji sistemleri, güneş kentler gibi yeni kavramların açık alanlara ve yayılmaya gereksinimleri vardır. Ancak nüfus arttıkça kentlerin aşırı yayılmasını önlemek adına dikey yapılaşmada bir ölçüde yarar bulunmaktadır. Bu çalışmada bu ikilemi en uygun biçimde çözmek için Enuygun Kentleşme Modeli, *EUKM* geliştirilmiştir. Bu model binalara ve bölge enerji sistemine ilişkin gömülü ve işletimsel CO₂ salım toplamlarının en aza indirgenmesi için ortalama bina kat adedini eniyilemek üzerine kurulmuştur. Binaların ortalama kat adedi n_{ort} a bağlı olarak toplam gömülü CO₂, Şekil 9 ve Çizelge 3'e benzer verilerden, binaların işletme sırasındaki enerji tüketimleri de hesaplanabilir. Toplam CO₂ salımında dört adet öge bulunmaktadır. Bunlar bölge enerji sisteminin gömülü ve işletimsel ögeleri ve binaların gömülü ve işletimsel ögeleridir yapılan çalışmalar sonunda aşağıdaki amaç fonksiyonu geliştirilmiştir:

$$\sum CO_2 = W \left(e + f \sqrt{\frac{g \times P^x}{3 \times \pi \times v \times n_{ort}}} \right) + Z(h + i \times n_{ort}) \quad \{\text{Amaç: En Az Salım}\} \quad (10)$$

Burada e, f, g, h ve i , eşitliğin geliştirilmesindeki ara basamaklarda oluşan sabit çarpanlar, x sabit bir üs, v ise kentleşmede arazi boşluk katsayısıdır (Örneğin 0,3). Parantez içerisindeki ilk terim bölge enerji sisteminde gömülü ve işletimsel olmak üzere, alt yapının oluşturulmasını takiben, ulaşım, diğer yerel yönetim hizmetleri, genel aydınlatma gibi enerji tüketimlerini ve faaliyetlerine bağlı olarak ortaya CO₂ salımlarını simgelemektedir. Bölge enerji sistemleri, bireysel ve bina tabanında hizmetler bağlamında, örneğin konfor ısıtması ve klima gibi etkinliklerde, net bir biçimde daha verimli, dolayısı ile daha az CO₂ salımlıdır. Bu açıdan enerjinin dağıtımındaki ek enerji tüketimlerinin de göz önünde tutulması gerekir. Buna bir yataylık çarpanı W tanımlanmıştır. Buna karşın net CO₂ salımındaki tasarruf da bu kez Eşitlik 8 de verilen amaç fonksiyonunun ikinci terimine (Binalar) dikeylik çarpanı olarak ve Z simgesi ile tanımlanmıştır. İkinci parantez binaların CO₂ salımlarını simgelemektedir. Sonuç olarak W ve Z amaç fonksiyonunun iki ağırlık faktörü olmaktadır. İlk parantez n_{ort} ile ters orantılı, ikinci parantez ise n_{ort} ile doğru orantılıdır. Şekil 15'de amaç fonksiyonunun iki ögesinin n_{ort} a göre değişimi görülmektedir. P değeri (Nüfusu) 100000 olan yeni bir kentte toplam CO₂ salımını en aza indirgeyecek n_{ort} değeri örnek bir çalışma

ile hesaplanmıştır. Kentleşmede *boş alanların toplam alana oranı* olan boşluk katsayısı (ν) 0,3 alınmıştır. Buna göre n_{ort} değeri 17 olarak bulunmuştur. Bu değer, güneş enerjisinin orta yükseklikteki binalarda çok etkin olamamasına karşın, oldukça geniş araziye yayılacak yeni kentin merkezi veya merkezden yayılan uydu ara santrallerde güneş enerjisi rüzgâr, varsa jeotermal ve şehrin biyogazından elde edilen enerji ile üçlü üretim sistemleri ile daha etkin değerlendirilecektir. Hatta, kentte hidrojen ekonomisi bile ileride uygulanabilecektir. Optimum kat adedi planlamacıların ve kent mimarlarının seçeceği ν değerleri ile de ilintilidir. Şekil 15’de bu ilinti de gösterilmiştir. Örneğin, ν değeri sırası ile 0,5 ve 0,7 ile değiştirildiğinde enuygun ortalama kat adedi sırası ile 13 ve 11’e inmektedir. Yani kentleşme yoğunlaştıkça aynı nüfusun daha az katlı fakat daha çok binada barındırılması söz konusudur ve kent yarıçapı azalarak bölge enerji sisteminin CO₂ sorumluluğu azalmaktadır. Ortalama kat adedi azaldıkça binaların gömülü enerji ve CO₂ miktarı azalır. Bununla birlikte bölge enerji sistemi ne kadar çok sayıda yaygın binaya hizmet verirse, dağıtım ekipman maliyeti ve gömülü enerji miktarları çoğalır. İleriki çalışmalarda bu değişkenin de çözüme katılması yararlı olacaktır. Bu modelin amaç fonksiyonunun aşağıdaki kısıtları ve sınır koşullarını gözetmek durumundadır. Öncelikle, bir bölge enerji sistemindeki ortalama boru uzunluklarının (L) ortalama kat adedi ile bir ölçüde kısalacağını sonra da kat adedi arttıkça her boruda iletilmesi gereken ısı gücünün (Q) artmasına karşın boru içerisindeki akışkan hızı aynı kalmak üzere boru çaplarının (D) büyütülmesi gereği göz önünde tutulmalıdır:

$$L(n) = an^{-k} \quad (11)$$

$$Q(n) = bn^l \quad (12)$$

$$D(n) = \frac{Q(n)}{n^2} = \left(\frac{bn^l}{n^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{\{Borulardaki akışkan hızını } n \text{ ile değiştirmemek üzere}\} \quad (13)$$

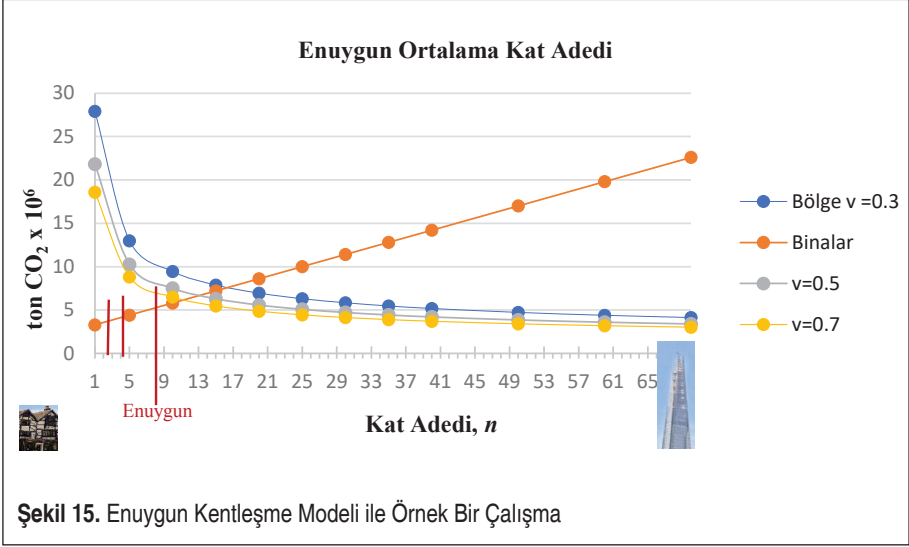
$$CO_{2g} \propto BD^m L = B \left[n^{(lm/2-k)} \right] \quad \text{\{Boru çapı ve uzunluğu ile ilgili gömülü CO}_2 \text{ salımı}\} \quad (14)$$

$$P_E(n) \propto Q(n)^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Burada, m üssü boru et kalınlığının boru çapı ile değişen basınç dayanımına olan katkısı içerir. Söz konusu gömülü CO₂ salım sorumluluğuna karşın ortalama kat adedine bağlı olarak azalma eğilimindeki pompa güç talebinin (P) işletmedeki CO₂ salım sorumluluğu karşılaştırıldığında kat adedine bağlı geri-dönüş süresi (Y) elde edilir:

$$Y(n) = Cn^{\left(\left[\frac{m}{2}+1\right]-k\right)} \quad (16)$$

Yukarıdaki eşitliklerde a , b , k , l , m , B ve C katsayı ve üsleri belirli bir bölge enerji sistemine özgü değerlerdir. Bu değerlere bağlı kalarak:



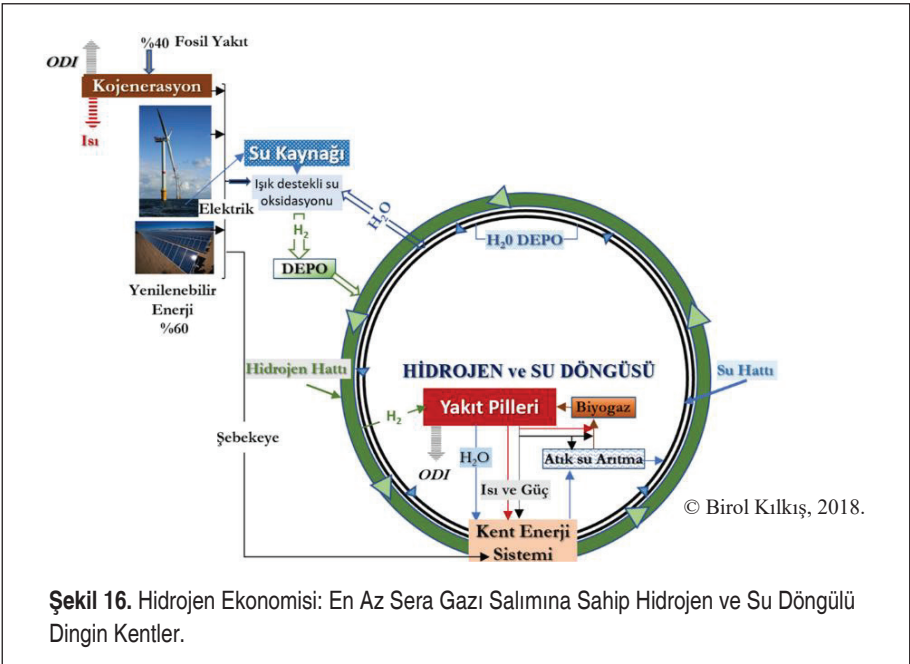
- a- $\left[\frac{m}{2} + 1 \right] - k > 0$ ise geri ödeme süresi n ile uzar,
- b- $\left[\frac{m}{2} + 1 \right] - k = 0$ ise geri ödeme süresi n değerinden bağımsızdır,
- c- $\left[\frac{m}{2} + 1 \right] - k < 0$ ise geri ödeme süresi n ile kısalır.

Uygulamada ise genelde (a) koşulu geçerli olduğundan enerji, ekserji, CO₂ salımları ve yatırım parametrelerin gömülü değerlerinin geri ödeme süreleri uzar. Bu nedenle ortalama kat adedi bir bölgede mümkün olduğunca az tutulmalıdır. Ancak, yukarıdaki katsayılar ve üsler geri ödenmesi incelenen parametrelere göre değişiklik gösterebileceği ve değişik parametreler için değişik sonuçlar elde edilebileceği hatırlanmalıdır.

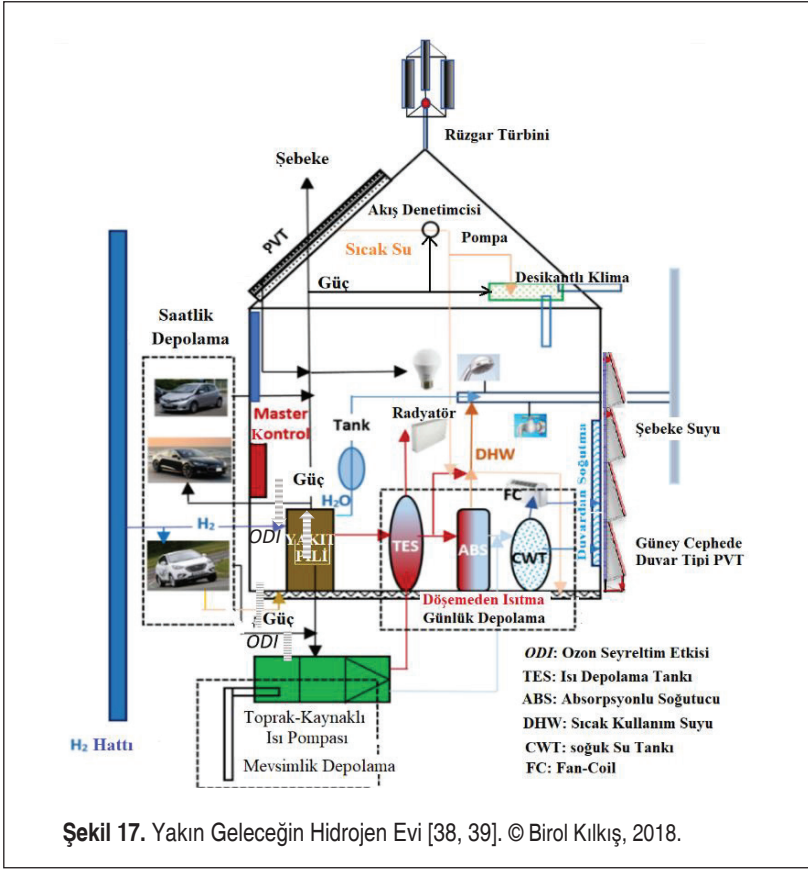
5. GELECEĞİN KENTLERİ

Şekil 16 da yenilenebilir enerji kaynaklarını yerinde %100 e yakın bir oranda üreten ve değerlendiren, sıfıra çok yakın salıma sahip bir kent öngörüsü sunulmaktadır [7]. Bu çözümde kendi içerisinde sadece su ve yenilenebilir enerji döngüsünü sağlayan taşıyıcı ve depolayıcı hidrojen bulunmaktadır. Bu bir ütopya değildir ve bu tür yenilikçi çözümleri uluslararası gündeme almak zorundayız. Hidrojenin sudan eldesinin akılcı olabilmesi için tüm tüketilen enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından ve varsa yüksek entalpili artık enerjiden sağlanması gerekir. Gene de fosil yakıt desteğine çoğu kez gerek duyulur. Bu nedenle enerji kaynakları ister yenilenebilir ister fosil yakıt

kökenli olsun, ekserji yıkımlarının neden olduğu dolaylı CO₂ salımları ile fosil yakıtların neden olduğu doğrudan CO₂ salımları ve diğer zararlı gaz ve parçacık salımları nedeni ile ozon tabakasının incelmeleri ve iklimsel ısınmanın ortak göstergesi olan ODI faktörü her zaman sıfırdan büyüktür. Elde edilen hidrojen depolanmakta ve böylelikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve değişken olma sorunları önemli ölçüde giderilmiş olur. Hidrojen deposundan bölgenin talebi oranında dağıtılan hidrojen, kentte yakıt pillerinde yanmaksızın veya birlikte ısı ve güç sistemlerinde yakılarak değerlendirilir. Kentin atık su arıtma sisteminde elde edilen biyogaz yakıt olarak tüketilir. Su hattında ise hidrojen-su döngüsü önemli ölçüde tamamlanır. Hidrojen tamamen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edildiğinde, diğer fosil yakıtlara oranla sadece %5 oranında CO₂ salımından sorumludur [38]. Öte yandan hidrojen, yakıt pillerinde tek atık su olmaktadır. Hidrojen türbin veya içten yanmalı motorlarda yakılarak kullanıldığında az miktarda NOx salınır. Şekil 17 ise kent enerji sistemine bağlı bir hidrojen evi gösterilmiştir. Bu ev kentsel hareketlilik anlamında benzinli, melez (Hibrit), elektrikli veya hidrojen arabaları ile günlük enerji depolama yanı sıra elektrik-hidrojen alışverişinde bulunmaktadır. Çatısında ve uygun cephelerinde PVT sistemleri güç ve ısı üretmektedirler. Yazın konfor soğutulmuş duvar panelleri ve desantantlı klima sistem melezli ile sağlanmaktadır. Yüklerin karşılanmasında yüksek COP değerine sahip ısı pompaları da kullanılabilir. Kışın ısıtma gene melez biçimde yapılır. Döşemeden ısıtmada yakıt pili artık ısı, PVT paneller ve varsa toprak-kaynaklı ısı pompasından sağlanmaktadır.



Şekil 16. Hidrojen Ekonomisi: En Az Sera Gazı Salımına Sahip Hidrojen ve Su Döngülü Dingin Kentler.



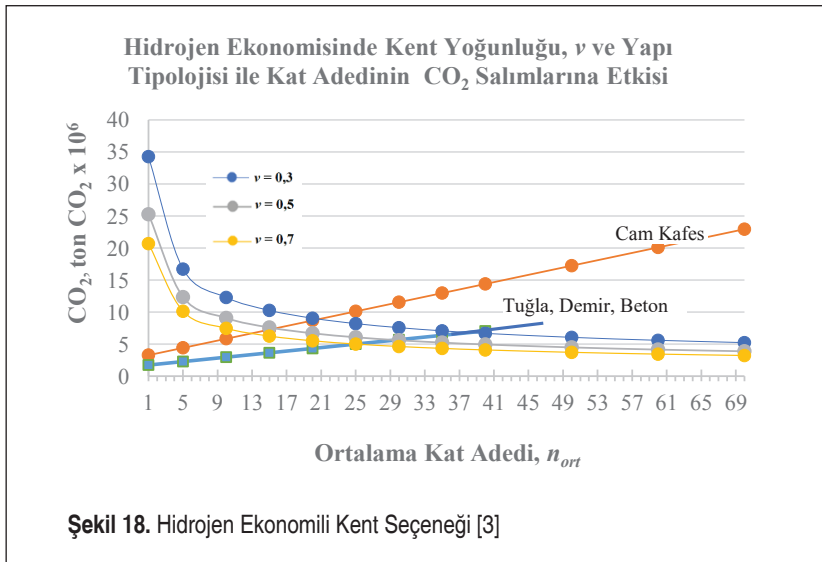
Ancak, ısı pompaları hem tükettikleri elektrik enerjisinin beraberinde getirdiği CO₂ ve su buharı salımlarına ilişkin *GWP* sorumlulukları hem de bünyelerinde bulundukları soğutucu gazların atmosfere sızması ile ozon seyreltici etkiye (*ODP*) sahiptir. Elektrik gücü her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlansa sistemlerdeki ekserji yıkımları sonucu önlenemez CO₂ salımları bulunmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma güneş enerjisinden binalarda yararlanmada en önemli iki parametrenin bina yüksekliği ve cephe giydirmesinde kullanılan malzemenin gömülü enerji ve ekserjileri olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda yüksek ve cam cepheli binalarda her ne kadar saydam PV gözelerin kullanımı akılcı gözükse de yapılan hesaplamalar aksine işaret etmiştir. Ayrıca yeni oluşturulacak yapı çevrede ortalama kat adedini eniyelecek bir analitik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde kentin bölge enerji sistemi ile

optimum genişlikte tasarımı yapılabilmekte, buna karşın da ortalama kat adedi bulunabilmektedir. Bu çalışmada kat adedinin çok önemli olduğu bir örnekle geliştirilen model kullanılarak gösterilmiştir. Bu örnek uygulama Ankara'ya yakın bir alanda kurulacak kavramsal kenti içermektedir [3]. Geleceğin yüzde-yüz sürdürülebilir enerjili kentin tahmini nüfusu 200.000 kişi olacaktır. Bölgedeki yıllık ortalama ışınım şiddeti 3,92 kWh/m²-gün olarak kabul edilmiştir. Kentin güneş enerjisinden en fazla düzeyde yararlanabilmesi için binaların hem uygun dış cephelerine tümleşik biçimde hem de hem çatılarına PV gözeler yerleştirilecektir. Bu gözelerin ortalama verimleri sırası ile %9 ve %18 olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bölgedeki iklim az da olsa PVT panellerin uygulanmasına müsaade ettiği için bu seçeneğe de yer verilmiştir. Bu sanal projede iki yöntem sınanmıştır. Bunlardan birincisi jeotermal enerji ile tümleşik doğal gazlı bir bölge ısıtma sistemi, ikincisi ise hidrojen ekonomili bir bölge ısıtma sistemidir (Şekil 16 ve Şekil 17). İkinci yöntemde rüzgâr, güneş, biyogaz enerji sistemleri kullanılmaktadır. İki yöntemde de klasik bina malzemeleri ile inşa edilecek bina tipolojisi (Tuğla, çimento çelik) ve yüksek, cam kafes binalar göz önünde tutulmuştur. Böylelikle, model eniyi ortalama kat adedini belirlerken bina tipolojisinin yanında kent alanı yoğunluğunun da önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla hazırlanan grafikler şekiller aşağıda gösterilmiştir.

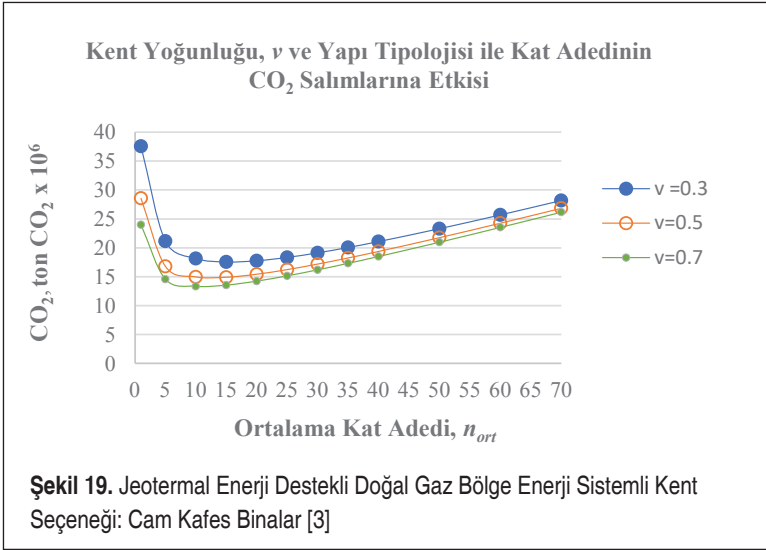
Hidrojen ekonomili kent seçeneğinde eğer cam kafesli yüksek binalar çoğunlukta olursa ve kent alan yoğunluğu, ν sırası ile 0,3, 0,5 ve 0,7 olarak planlandığında müsaade edilebilir ortalama kat sayıları da sırası ile 21, 15 ve 13 olur. Optimum çözüm ise $\nu = 0,7$ ve $n_{ort} = 13$ olup bu durumda toplam minimum CO₂ salımı $7,45 \times 10^6$ ton/





yıl olur. Aynı koşullarda eğer alışılmış bina malzemeleri kullanılacak olursa ortalama kat adedi sırası ile 40, 30 ve 25 olur. Minimum CO₂ salımı ise gene $v = 0,7$ ve $n_{ort} = 25$ koşullarında $5,65 \times 10^6$ ton/yıl olur ki bu değer cam kafesli bina ortalamasına göre yaklaşık %25 daha azdır. Bu fark 200,000 kişilik bu tür bir kentte kişi başına yılda 9 ton CO₂ salım sorumluluğunda azalma anlamına gelir. Diğer ilginç iki bulgudan birincisi, alışılmış yapı malzemeleri kullanıldığında CO₂ salımlarının kat adedine olan duyarlılığı cam kafes bina seçeneğine göre daha az olmasıdır. Bu grafiğe göre bu duyarlılıklar sırası ile $0,235 \times 10^6$ ton/yıl/kat artışı ve $0,62 \times 10^6$ ton/yıl/kat artışıdır. Bu nedenle, hidrojen ekonomisi şehir planlamacılarına daha fazla esneklik ve çevresel değerlerde daha geniş tolerans sağlamaktadır. İkinci ilginç konu ise cam kafes binalarda minimum CO₂ salımları için müsaade edilebilir en fazla kat sayısı beklenenin aksine alışılmış binalara göre daha az olmasıdır. Aynı tür bulgular jeotermal destekli doğal gazlı bölge enerji sistemi için de geçerlidir.

Aradaki tek fark, bu seçeneğin çevreye olan etkisinin daha fazla olmasıdır. Örneğin, cam kafes binalarda CO₂ salımları en az 13×10^6 ton/yıl dolayındadır ve müsaade edilebilir kat adedi 5 ve en çok 10 olmaktadır. Sonuç olarak, hidrojen ekonomisi bölge enerji sistemleri biraz daha yoğun kentleşmeye (Kolay ve daha kısa ulaşım) ve biraz daha fazla kat adedine müsaade ederken CO₂ salımları da yaklaşık %40 azalmaktadır.



7. DEĞERLENDİRME ve TARTIŞMA

Cam kafes binalar enerji savurganı olarak tanınır. Hatta geçen yıl New York valisi bundan böyle bu tür binaların yapımına büyük yasal engeller getirileceğini belirtmiştir

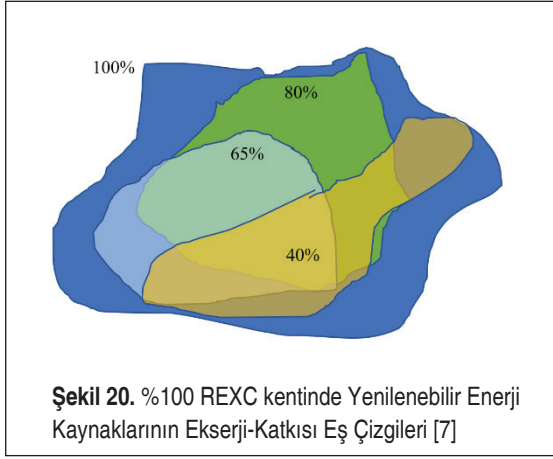
[40]. Buna karşın gene geçen yıl hemen aynı tarihlerde yerel gazeteler İzmir yeni Manhattan olacak türünde haberler yer almıştır. Neyse ki bazı kararnamelerle yüksek bina furyasına artık son verileceği anlaşılmaktadır. Ancak bunun temel nedenleri yeterince bilimsel ve açık değildir. Bu yönelime karşın yüksek bina savunucuları son yıllarda cam kafes bina mimarisinde büyük yatırımlara mal olan değişik enerji tasarruf önlem ve teknolojik sistemlerle bu olumsuzluklarından sıyrılmaya çalışmaktadır [35]. Her durumda da çabaların büyük çoğunluğu tekil binalarla sınırlı kalmaktadır [41]. Halbuki, bu makalede gösterildiği üzere sürdürülebilir kentlerdeki çoğulcu etkiler hala olumsuzluklarını korumaktadır ve şehir planlamacıları gömülü enerji, ekserji ve gömülü CO₂ salımlarının kentin ortalama kat adedi ile bütüncül ilişkilerine yeterli ilgiyi göstermemektedirler. Sonuç olarak da yüksek binalar ne denli enerji verimli olurlarsa olsunlar bu etkileri kentlere yansımamaktadırlar ve bütüncül modeller gereklidir [42-45]. Doğal olarak bu denli karmaşık bir kentleşme stratejisini geliştirmek de pek kolay değildir. Bu makalede yer alan model ise bu gereksinime de cevap verebilecek bir örnek oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, artık bir tek binanın sürdürülebilir olmasının ötesinde tüm kentlerin çevreci, insan sağlığına önem veren, hava kirliliğini sıfırlayabilen, kendi enerjisini kendi üretebilen sıfır atığa yakın mutlu yaşayan ve mutlu yaşatan kentler olması gerekmektedir. Bu gerek doğrultusunda da tasarım ölçütlerinin ve amaç fonksiyonlarının enerjinin niceliğinden niteliğine doğru kaydırılması zorunlu olmaktadır.

Kentler yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneldikçe önceden itibar edilmeyip yörede çok yaygın biçimde bulunan ve çok düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının değerlendirilmeleri gündeme gelmektedir Geçiş mevsimlerinde güneş panellerinden elde edilen ılık su (Lejyoner hastalığı riskine karşı ısının sadece kapalı devrelerde tüketilmesi kaydı ile), düşük entalpili jeotermal kaynaklar, yer ısı, termik santral artık ısıları bağlamında 35°C sıcaklıkta çalışan bölge ısıtma sistemleri geliştirilmektedir. Sıcaklık değerleri azaldıkça sürdürülebilir enerjinin kentin ekserji- kırılımlı taleplerinin karşılanmasında enerjinin niceliğinden çok niteliği ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, yüzde-yüz enerji yerine yüzde-yüz yenilenebilir ekserjili kent tanımı öne sürülmüştür. Böylelikle sürdürülebilir kent tanımına ekserji tabanında yeni bir tanım getirilmiş olmaktadır.

%100 Yenilenebilir Ekserji Kenti (100REXC): Yasal kent sınırları içerisinde, toplam güç (Elektrik), ısı ve soğukun ekserji taleplerini bir yılda en az %75'ini kendi sınırları içerisinde konuşlu yenilenebilir enerji kaynaklarından ve kendi artık ısısından, yeterli ve akılcı enerji depolama sistemlerini de bünyesinde barındırarak karşılayabilen, geri kalan en fazla %25'ini kent sınırları dışındaki yenilenebilir enerji sağlayıcılarından alan bir kente 100REXC sertifikası verilir. Sistemin işleyişi ise saatlik tabanda şehir planı üzerinde elektronik ortamda izlenerek eşit-karşılama çizgilerinin de örtüşebilmesi için enerji kaynakları yönlendirilir ve enerji talepleri de yönetilir [7] (Şekil 20). Sürdürülebilir kentler konusundaki ölçme ve değerlendirme



alanında son yıllarda yapılan en büyük atılım *SDEWES Index*'dir [46]. Bu indeks kentlerin sürdürülebilirlik düzeyini tanımlarken ekserji akılcılığını da dolaylı biçimde göz önünde tutmaktadır. *SDEWES Index*'in şu andaki versiyonunda dünyanın değişik ülkelerinden 120 adet kent bulunmakta ve yedi adet sürdürülebilirlik parametresi ile değerlendirilerek başarılı kentler rehber olarak seçilmekte ve daha az başarılı kentlerle eşleştirilerek uluslararası iş birliği de güçlendirilmektedir. Yedi parametre ise: İklim ve enerji tüketimi, enerji ve CO₂ salım ilişkilerine verilen önem, yenilenebilir enerji potansiyeli ve değerlendirme oranı, su kullanımı ve çevre niteliği, endüstriyel profil ve CO₂ salımları, kentsel planlama ve sosyal refah, Ar-Ge, hayata geçiriş ve sürdürülebilirlik politikalarıdır.



Eşzamanlı olarak LEED for Cities ve BREEAM for Communities gibi yeşil bina sertifikasyon sistemleri de yeşil kentlere yönelik yeni sertifikasyon programları açmışlardır [47-48]. Ayrıca Türkiye’de ÇEDBİK Yeşil Konut Sertifikası (B.E.S.T-Konut Sertifikası) [49], Mimar Sinan Üniversitesinin geliştirmiş olduğu SEEBTR-Sürdürülebilir Enerji Etkin Binalar Sertifikasyon Programı [49] gibi ulusal programlar da bulunmaktadır. Söz konusu referansta örneklenen yeşil binaların %50 si yüksek binalardır. Bu ise bu gibi sertifikasyon programları kat adedinin artı ve eksilerini puanlamaya katmadıklarını göstermektedir. Ancak dolaylı olarak işletimdeki zorluklardan ötürü bazı puanlar etkilenmiş olabilir.

Bu programlarda gömülü uçucu organik maddeler, yeşil malzeme kullanımı ve hatta gömülü enerji ve CO₂ konularına yer verilmekte ancak süreçteki ekserji yıkımları ve bu yıkımlara bağlı önlenebilir CO₂ hesapları ve bu hesapların bütüncül bir biçimde kentteki ortalama kat adedi olan ilişkileri içerilmemekte ve böyle bir puanlama da yoktur. Halbuki bu modelde geliştirilen eşitliklere göre bu parametreler çok önemlidir. Bu parametrelere sadece TSE Güvenli ve Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemi dolaylı da olsa yer vermektedir [49].

Sonuç olarak, birçok yeşil bina sertifikasyon sistemi olmakla birlikte bunların hiç birisi kentleşme boyutunda enerji verimliliği odağının dışında enerjinin ne denli akılcı kullanıldığı değerlendirilmemektedir. Örneğin her dairede yoğunmalı kazan kullanılırsa doğal gazın kalitesinin akılcı değerlendirme oranı sadece %6'dır. Halbuki merkezi bir sitemde ısıtma, elektrik, klima ve servis suyu taleplerinin bir arada karşılandığı üçlü üretim sistemlerinde bu akılcılık %80 dolayında olabilmektedir. Bu akılcılık düzeyi sadece enerjide değil CO₂ salımlarında da önemli ölçüde azaltım anlamı taşır. Öte yandan, elektro-mekanik tesisat çerçevesinde, seçilecek olan enerji dönüştürüm, depolama, iletim ve kullanım sistem ve cihazlarının da tip seçimlerinde kat çok önemlidir. Bu nedenle tüm bina sertifikasyon sistemlerinden başlamak üzere yeşil kent sertifikasyon sistemlerinde de bina yüksekliği (Kat adedi) de mutlaka değerlendirmelerde etkili biçimde yer almalıdır.

8. SİMGELER

A_T	Bina toplam kullanım alanı, m ²
A_{PV}	PV gözelerinden oluşan güneş panel(ler)i toplam alanı, m ²
BCA	Brüt çatı alanı, m ²
BDA	Toplam brüt döşeme alanı, m ²
c	2 sayılı eşitliğin çarpanı
COP	Isıtma (Veya Soğutma) tesir katsayısı
CDO	Brüt çatı alanının brüt toplam döşeme alanına oranı
DCA	Toplam dış cephe alanı, m ²
D	Ortalama boru çapı, m
DF	Eş-zamansızlık (Diversite) oranı
FAR	Kullanılabilir toplam döşeme alanının binanın zemin alanına oranı (Floor Area Ratio)
GCO	Saydam PV gözelerle kaplanmış cam cephe oranı
GE	Gömülü Enerji, GJ/m ²
GEX	Gömülü ekserji, GJ/m ²
GFA	Binanın toplam brüt döşeme alanı (Gross Floor Area), m ²
GWP	Küresel ısıtma potansiyeli
KO	Katların ortalama elektrik yüküne göre bina elektrik yükünün güneş enerjisi ile karşılanma oranı
I_d	Güneş paneli yüzeyine dik gelen ortalama ışınım yoğunluğu, W/m ²
I_{yy}	Yatay düzeydeki yıllık toplam ışınım, kW-h/m ² -yıl
I_{yd}	Dikey yüzeye gelen ışınım, yıllık toplam ışınım, kW-h/m ² -yıl
L	Bir bölge enerji sistemindeki ortalama boru uzunlukları, m
m	2 sayılı eşitliğin üssü
n	Binadaki tam kat adedi
n_{ort}	Kent binalarının ortalama kat adedi



NEB	Net enerji dengesi
NO_x	Azot oksit bileşiği
ODI	Ozon seyreltim endeksi (ODP ve GWP ortak etkisi)
ODP	Ozon tabakasının seyreltim potansiyeli
P	Kentin nüfusu, kişi
PE	Potansiyel enerji, kJ/ton
P_E	Pompanın güç (Elektrik) talebi, kW
Q	Her boruda iletilmesi gereken ısı güç, kW
Q_E	Binadaki katların her birinin ortalama elektrik yükü, kW
W	Yataylık çarpanı (Kent)
x	PV ve veya PVT uygulamasının yatırım maliyetini 50 yılda geri ödeme oranı
Z	Dikeylik çarpanı (Yapılar)
Y	Geri dönüş süresi, yıl
$YEÜ$	1 m ² lik bir Güneş panelinin yıl boyu üretebildiği enerji, kW-h
ΔCO_2	Önlenebilir CO ₂ salım sorumluluğu, kg CO ₂ /kW-h _{ısı}
z	Doğrudan ışınım/toplam ışınım
η_{ev}	Evirici verimi, %
η_{PV}	Yıllık ortalama PV verimi, %
ε_{arz}	Arz edilen birim ekserji, kW/kW
ε_{talep}	Birim ekserji talebi, kW/kW
ψ_R	Akılcı ekserji yönetim verimi
v	Kentleşmede boş alanların toplam alana oranı: boşluk katsayısı
θ_L	Enlem, °
θ_z	Zenit açısı, °

KISALTMALAR

ABS	Absorpsiyonlu Soğutma Makinesi
AC	Almaşık (Alternatif) akım
ASHRAE	American Society of Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
BIPVT	Bina Yüzeylerine Gömülü PVT
CWT	Soğuk Su Depolama Tankı
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirmesi (Raporu)
ÇEDBİK	Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği
DC	Doğru akım
DHW	Sıcak Kullanım Suyu
EUKM	Enuygun Kentleşme Modeli
FC	Fan-Coil
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
PV	Foto-elektrik göze

PVT	Foto-Elektrik-Isı Paneli
REMM	Akılcı Ekserji Yönetim Modeli
TES	Isı Depolama Tankı
100%REXC	%100 Yenilenebilir Ekserji Kenti (100% Renewable Exergy City)
SDEWES	The International Centre for Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
YP	Yakıt Pili

KAYNAKÇA

1. **Al-Kodmani, K.** 2012. The Logic of Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, CTBUH Research Paper: International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 1, No.2, pp: 131-148. <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>, son erişim tarihi: 8 Mayıs 2020.
2. **Ellis, P.G., Torcellini, P.A.** 2005. Simulating Tall Buildings Using EnergyPlus, Proc. of the 9th Int. IBPSA Conference on Building Simulation, Montreal, Canada, pp: 279-286, August 15-18.
3. **Kılış, B., Kılış, Ş.** 2017. An Urban Planning Algorithm for Optimizing the Height of Buildings to Maximize the Share of PV Electricity Generation in a Nearly-Zero Exergy District, First Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems, January 28-31, Rio, Proceedings on Line. <https://www.rio2018.sdwes.org/>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
4. **Kılış, B.** 2020. Küresel Kapitalizmde Küresel Salgınlar, İklimsel Isınma ve Atmosfer, BRİQ Dergisi, Yaz Sayısı,
5. ÇMO, 2019. Hava Kirliliği Çevre Raporu-2018, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Raporu, http://cmo.org.tr/resimler/ekler/9d62b3a2bb620a4_ek.pdf, son erişim tarihi: 8 Mayıs 2020.
6. **Kılış, B.** 2019. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Kanal İstanbul Projesi Çevresel Etki Değerlendirmesi Raporu Hakkında Kişisel Görüş, Öneriler ve İtiraz Belgesi, 26 sayfa, Çevre ve Şehircilik Bakanlığına Sunu, 30.12.2019. Ankara.
7. **Kilkis, B.** 2020. Barriers, Solution, and Metrics for 100% Renewable Cities, Special Report to ETIP RHC Meeting, 2 March 2020, Brussels.
8. **Simmonds, P.** 2016. ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall and Megatall Building Systems, REHVA Journal, October Issue, pp: 45-52, 2016.
9. CTBUH. 2019. Tall Buildings in Numbers, Tall Buildings and Embodied Energy, CTBUH J., 2009 Issue: 50-51, 2009.
10. **Dawodu, A., Cheshmehzangia, A.** 2017. Impact of Floor Area Ratio (FAR) on Energy Consumption at Meso Scale in China: Case Study of Ningbo, The 8th Int. Conf. on Ap-



plied Energy- ICAE2016, Energy Procedia 105, 2017, pp: 3449-3455.

11. **Chau, K-W, Wong, S. K., Yau, Y., Yeung, A. K. C.** 2007. Determining Optimal Building Height, Urban Studies, Vol. 44, No. 3, Special Theme: Supertall Living (March 2007), pp: 591-607. <https://www.jstor.org/stable/43084360>, son erişim tarihi: 9 Mayıs 2020.
12. **Mert, Y.** 2014. Application of Exergy Analysis Method to Energy Efficient Building Block Design, Ph.D., Thesis in City Planning and Regional Planning, Izmir Institute of Technology, Izmir, 2014.
13. Government of Ireland. 2017. Urban Development and Building Heights Guidelines for Planning Authorities December 2018. https://www.housing.gov.ie/sites/default/files/publications/files/urban_development_and_building_height_guidelines_for_planning_authorities_december_2018_0.pdf, son erişim tarihi: 9 Mayıs 2020.
14. **Kılış, B.** 2017. Bina ve İklim Bölgelerine Göre Güneş Enerjisinden En Çok Yararlanma Yöntemleri, 7. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 22-23 Eylül 2017, Mersin, Bildiriler Kitabı, MMO Yayın No: 673, pp: 63-86, ISBN: 978-605-01-1053
15. **Kılış, Ş., Kılış, B.** 2019. An Urbanization Algorithm for Districts with Minimized Emissions Based on Urban Planning and Embodied Energy Towards Net-Zero Exergy Targets, Energy, 179, 2019, pp: 392-406.
16. **Kılış, Ş.** 2011. A Rational Exergy Management Model to Curb CO₂ Emissions in The Exergy-Aware Built Environments of The Future, Ph.D. Thesis, Bulletin/Meddelande No. 204, ISBN 978-91-7501-129-5, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
17. CE. 2012. Clarke Energy, The Shard Combined Heat and Power Plant, <https://www.clarke-energy.com/2012/the-shard-combined-heat-and-power-plant/>, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
18. **Dietrich, S., Anna, K., Markus, B., Svend, S., Natasa, N., Kai, S.** 2014. Low Temperature District Heating for Future Energy Systems, Anna, L. (Ed.): 14th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC 2014. Proceedings: September, 6.10, 2014, Stockholm, Sweden, Swedish District Heating Association, 2014, ISBN: 978-91-85775-24-8, pp.8-15.
19. **Kılış, B., Özgür, E.** 2018. Güneş Enerjisinin Akılcı Değerlendirilmesinde PVT Sistemleri, Bölüm 12.2. Türkiye'nin Enerji Görünümü, sayfa 373-381. Makine Mühendisleri Odası, Oda Raporu, Yayın No. MMO/691, Nisan 2018, Ankara. ISBN: 978-605-01-1198-9.
20. <https://zerohomebills.com/product/tesla-powerwall-2-13-5-kw/>, son erişim tarihi: 8 Mayıs 2020.
21. **Kılış, B., Erol, Ö.** 2011. Turgut Özal Tıp Merkezinde Enerji Verimli Isı/Soğuk ve Güç Sistemi Kurulum Projesi Danışmanlık Raporu, 2 Cilt, Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2011.
22. **Kılış, B., Kılış, Ş.** 2015. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Birleşik Isı ve Güç Üretimi, TTMD, 32, ISBN: 978-975-6263-25-9, 371 sayfa, DSYG, İstanbul, 2015.

23. **Kılış, B., Kılış, Ş., Kılış, Ş.** 2017. Optimum Hybridization of Wind Turbines, Heat Pumps, and Thermal Energy Storage Systems for Near Zero-Exergy Buildings (NZEXB) Using Rational Exergy Management Model, Paper No. 2, 12th IEA Heat Pump Conference, 15-18 May, Rotterdam 2017. Papers on line, P.1.3.8, <https://na.eventscloud.com/ehome/165152/520581/>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020. Abstracts in print, pp: 179-180. Proceedings, ISBN 978-90-9030412-0, Rotterdam, June 2017.
24. **Kılış, B.** 2020. Exergy to the Rescue: A Handbook of Quality of Life and Quality of Energy: Almost 50 Years of Formulae and Metrics 1972-2020-A Formula Bank for Engineers, 177 pages, (In print).
25. **Kılış, B.** 2019. Development of a Composite PVT Panel with PCM embodiment, TEG Modules, Flat-Plate Solar Collector, and Thermally Pulsing Heat Pipes, Solar Energy, Vol. 200, April 2020, pp: 89-107, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.075>, son erişim tarihi: 8 Mayıs 2020. Turkish Patent: TR 2017 10622 B.
26. Yaşam Magazin.17 Ağustos 2017. <http://m.finansgundem.com/haber/istanbulda-depremtoplanma-alanlari-avm-oldu/1222198>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
27. **Kılış, Ümit.** Güneş Enerjisi ve Hukuk, TIBTD Dergisi, Cilt 4, Sayı 1, s:53-54, Mayıs 1981, Ankara
28. NREL, PV FAQs, What is the Energy Payback for PVs, 2004, <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
29. **Fthenakis, V. M., Kim, H.C., Alsema, E.** 2008. Emissions from Photo Voltaic Life Cycles, Environ. Sci. Technol., 2008, 42 (6), pp: 2168–2174, 2008.
30. **Cronin T. V.** 2012. On the Choice of Average Solar Zenith Angle, Journal of The Atmospheric Sciences, Vol. 71, pp: 2994-3003. <http://web.mit.edu/~twcronin/www/document/Cronin2014.pdf> son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
31. **Fangzhi Chen, F., Wittkopf, S.K. Khai Ng, P., Hui Du, H.** 2012. Solar Heat Gain Coefficient Measurement of Semi-Transparent Photovoltaic Modules with Indoor Calorimetric Hot Box and Solar Simulator, Energy and Buildings 53, 2012, pp: 74-84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.005>
32. **Poh Khai Nga, P.K., Mithraratnea, N., Kuac, H. W.** 2013. Energy Analysis of Semi-Transparent BIPV in Singapore Buildings, Energy and Buildings, 66, 2013, pp: 274-281, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.029>
33. **Kristine Lofgren, K.** 2018. Newly-Revealed Tesla Solar Roof Patent Shows The Secrets Behind The Technology, InHabitat, 05/07/2018. <http://inhabitat.com/tag/solar-roof/> son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
34. Zigisha, Mhaskar, Case Study of Pune, Eco-Friendly Building Materials, Business, August 6, 2013. <https://www.slideshare.net/Istikore/eco-friendly-building-materials>, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
35. **Raji, B.Tenpierik, M. J., van den Dobbelsteen, A.** 2016. A Comparative Study: Design Strategies for Energy -Efficiency of High-Rise Office Buildings, Journal of Green Building: Winter 2016, Vol. 11, No 1, pp:134-158.
36. M. B. Stevens, Reclaiming Energy from Waste Water in Tall Buildings, US Patent



US8610295 B1, 2013. <http://www.journalofgreenbuilding.com/doi/abs/10.3992/jgb.11.1.134.1?code=copu-site>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.

37. **Kılış, B.** 2020. New Frontiers in Sustainability Metrics for Renewable Energy Utilization and Storage, 4th SEE SDEWES Conference 2020, June 28-July 2, Sarajevo, <https://www.sarajevo2020.sdwes.org/>, son erişim tarihi: 8 Mayıs 2020. (Invited Paper for Special Session, Under Review).
38. **Kılış, B., Kılış, Şiir.** 2018. Hydrogen Economy Model for Nearly Net-Zero Cities with Exergy Rationale and Energy-Water Nexus, *Energies* 11 (2018) 1226, <<https://doi.org/10.3390/en11051226>>, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
39. **Kilkis, B.** 2019. Design of a Sustainable Hydrogen House for Future Hydrogen Cities, 4th Hydrogen Technologies Congress, IHTC-2019, 20-23 June, Edirne, Proceedings Book, pp: 57-62. ISBN: 978-605-66381-6-9.
40. **Gray, A.** 2019. New York City Isn't Banning Glass Skyscrapers After All- Mayor De Blasio's Threats to Change the City's Iconic Skyline Are More Bark Than Bite, *Architecture+Design*, April 26, 2019, <https://www.architecturaldigest.com/story/new-york-city-isnt-banning-glass-skyscrapers-after-all>, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
41. **Hazem, E., Khaled, S. S. A., Ezzat, M., Tarek, M. F. A.** 2015. Energy-efficient tall buildings design strategies: a holistic approach, *Energy Procedia* 74 (2015) 1358-1369.
42. **Koroneos, C. J., Ioannis Kalemakis, I.** 2012. Exergy Indicators in the Building Environment, *Exergy*, Vol. 11, No. 4, 2012 (4):439-459, December 2012. DOI: [10.1504/IJEX.2012.050255](https://doi.org/10.1504/IJEX.2012.050255), https://www.researchgate.net/publication/233401766_Exergy_indicators_in_the_building_environment, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
43. **Gülbeden, A. E.** 2019. Yüksek Performanslı Binalarda Enerjinin Akılcı Kullanımı İçin Mekanik Tasarım ve Optimum Kontrol Algoritmasının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2019.
44. **Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W.** 2007. Glass architecture from the Modern Movement to the Present Day. In: *Glass Construction Manual*. 2nd Edition: Munich.
45. COST, Low-Exergy in The Built Environment Insights from the Cost Exergy Action, Analysis and Design of Innovative Systems for Low-Exergy in The Built Environment 2007-2012, COSTeXergy Book, Delft, 2014.
46. **Kılış, Ş.** 2018. Application of the Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Index to World Cities with a Normative Scenario for Rio de Janeiro, *J. sustain. dev. energy water environ. syst.*, 6(3), pp: 559-608, https://www.sdwes.org/sdwes_index.php, son erişim tarihi: 11 Mayıs 2020.
47. <https://www.usgbc.org/leed/rating-systems/leed-for-cities>, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
48. <https://www.breeam.com/discover/technical-standards/communities/>, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.
49. **Künar, A.** http://www.emo.org.tr/ekler/935500c4791d68b_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14, son erişim tarihi: 10 Mayıs 2020.