

## Yeşil çatı sistemlerinin su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi

Mert Ekşi <sup>\*1</sup>, Adnan Uzun <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University, Faculty of Forestry, Department of Landscape Architecture, 34473, Sariyer, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Işık University, Faculty of Fine Arts, Department of Landscape Architecture, 34398, Maslak, Istanbul, Turkey

\* Corresponding author e-mail (İletişim yazarı e-posta): [meksi@istanbul.edu.tr](mailto:meksi@istanbul.edu.tr)

Received (Geliş tarihi): 19.02.2015 - Revised (Düzelme tarihi): 03.03.2015 - Accepted (Kabul tarihi): 03.03.2015

**Özet:** Yeşil çatı kavramı, günümüzde sığ derinliğe sahip bir yetişme ortamı üzerinde (2-10 cm), değişken çevre koşullarına uyum sağlayabilen otsu bitki türleriyle bitkilendirilen, bakım ihtiyaçları düşük olan, üzerinde bulunduğu binaya ve şehre sağladığı katkılar nedeniyle tesis edilen ekstensif (az yoğun) çatı bahçeleri için kullanılan bir terimdir. Bu çalışmanın amacı, İstanbul iklim şartlarında yer alan bir yeşil çatı sisteminin, ısı yalıtımı, su tutma, yüzeysel akış, bitki büyüme durumu gibi özelliklerinin ve çevresel etmenlerle olan etkileşiminin karşılaştırmalı ölçümler yardımıyla belirlenmesidir. Çalışma kapsamında, bir araştırma alanı kurularak (İÜ Yeşil Çatı Araştırma İstasyonu), yeşil çatı sistemlerinin İstanbul şartlarında su ve enerji dengesi açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Bu sayede İstanbul şartlarındaki bir yeşil çatı sistemi su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmiş, kentle ve üzerinde bulunduğu yapıyla olan ilişkileri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, yeşil çatı sisteminin referans çatıya oranla genel ortalamada %77 oranında ısı verimliliği sağladığı tespit edilmiştir. Çatı yüzeylerinde oluşan sıcaklık dalgalanmaları, çatının yeşil çatı ile kaplı bölümünde %79 oranında daha düşük olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra çatı yüzeyine gelen yağış, yetişme ortamındaki nem içeriğine bağlı olarak %12,8 ile %100 oranında yeşil çatı sistemi içerisinde biriktirilmiş ve sistemden su tahliyesi 23 saate kadar ertelenebilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yeşil çatı, bitkilendirilmiş çatı, su, enerji, İstanbul.

## Assessment of green roof systems in terms of water and energy balance

**Abstract:** Green roofs concept term is used for extensive green roofs which are planted with herbaceous plants that can be adapted into changeable environmental conditions on a shallow substrate layer, require minimal maintenance, installed for their benefits to building and urban scale. Main objective of this study is to determine the characteristics of a green roof such as thermal insulation, water holding capacity, runoff characteristics, plant growth and its interaction with environmental factors in Istanbul climate conditions by performing comparative measurements. In this study, a research site (IU Green Roof Research Station) was founded to assess water and energy balance of green roofs. Thus, a typical green roof was evaluated in terms of water and energy balance and its interaction with the building and city was determined. energy efficiency of green roof system was 77% higher than reference roof. Temperature fluctuations on green roof section of the roof were 79% lower. In addition, green roof retained 12,8% - 100% of precipitation and delayed runoff up to 23 hours depending on water content of substrate.

**Keywords:** Green roof, vegetated roof, water, energy, Istanbul.

### 1. GİRİŞ

Çatıları bitkilendirme fikri binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Mezopotamya'daki birçok medeniyet, çatı bahçelerinin çeşitli tiplerini, buldukları kurak bölgeyi serinletmek ve bitkilendirmek amacıyla kullanmışlardır (Snodgrass ve Snodgrass, 2006).

**To cite this article (Atıf):** Ekşi, M., Uzun, A., 2016. Yeşil Çatı Sistemlerinin Su ve Enerji Dengesi Açısından Değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University* 66(1): 119-138. DOI: [10.17099/jffiu.67110](http://dx.doi.org/10.17099/jffiu.67110)



Günümüzde kullanılan yeşil çatıların ilham kaynağı, 19. yüzyılın başlarında Kuzey Avrupa’da çatı yüzeylerinin toprakla kaplanması ve bu yüzeyin çeşitli otsu bitkilerle bitkilendirilmesi ile ısı yalıtımı sağlanması amacıyla oluşturulan çatı sistemlerdir. Tunbiş (1987), bu sistemleri basitçe zemin seviyesinin üzerinde gerçekleştirilen bir peyzaj çalışması olarak tanımlamıştır. 1960’lı yılların başlarında İsviçre’de bu sistemlerden yardım alınarak geliştirilen modern yeşil çatı teknolojileri, özellikle Almanya ile birlikte birçok ülkede yaygınlaşmıştır (Bass ve Baskaran, 2003).

1980’li yıllarda çatı bahçelerinin uygulama prensiplerinin belirlenmesi amacıyla Almanya’da FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.- Peyzaj Araştırma, Geliştirme ve Konstrüksiyon Topluluğu) tarafından geliştirilen standartlar, çatı bahçelerinde kullanılan yapım tekniklerinin belirlenmesini ve dünyada yaygınlaşmasını sağlamıştır (Obendorfer ve ark., 2007). 1980’li yıllardan sonra inşa edilen çatı bahçeleri, bitki örtüsünü kent alanlarına geri getirme fikriyle inşa edilmiştir (Köhler, 2005).

Bitkilendirilmiş çatı sistemleri, ekstensif (seyrek) ve intensif (yoğun) sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu iki sistemin karışımı ile oluşturulan yarı-intensif sistemler de mevcuttur. “İntensif sistemler” çalı ve ağaçlarla bitkilendirilmiş, yer yüzeyindeki bir bahçeye benzer yoğun sistemler gerektiren (drenaj, sulama, yer kaplamaları vb.) ve daha çok estetik amaçlı tesis edilen alanlardır. Araştırmaya konu edilen “ekstensif sistemler” ise; son yıllarda “yeşil çatı” olarak da adlandırılan, genellikle Sedum türleri gibi rejenerasyon (yenilenme) yetenekleri yüksek ve kuraklığa dayanıklı yer örtücü bitkilerle bitkilendirilmiş, sığ yetiştirme ortamına sahip, gelişmiş drenaj ya da sulama sistemleri gerektirmeyen, daha çok üzerinde bulunduğu binaya ve şehre ekolojik katkıları nedeniyle tesis edilen çatı bahçeleridir. Bu sistemler geleneksel çatı bahçelerinin modern düzenlemesidir (Dunnett ve Kingsbury, 2004). Bitkilendirme tipinin değişmesi, yeşil çatı sistemini oluşturan yapısal katmanlarda değişikliklere yol açmaktadır (Ekşi, M., 2012). Yeşil çatı sistemleri “intensif çatı bahçelerine” göre daha az bakım gerektirmekte ve daha sığ yetiştirme ortamlarına ihtiyaç duymaktadırlar (Dunnett ve Kingsbury, 2004; Obendorfer, ve ark., 2007). Yeşil çatı kavramı, binaların yaşayan çevreye uyum sağlaması için kullanılan bir kavramdır. Ekstensif sistemler herhangi bir sulama sistemine ihtiyaç duymadan alt katmanlarında biriktirdiği suyu kullanabilmektedirler.

### 1.1 Yeşil Çatı Sistemlerinin Fiziksel Çevredeki Dengeleyici Özellikleri

Dünyada şehirlerin toplam nüfusu 20. yüzyılın başında 200 milyon kişiye (dünya nüfusunun %15’i), 21. Yüzyılın başında 2,9 milyar kişiye (dünya nüfusunun %50’si) ulaşmıştır. Bu oran, günümüzde gezegenimizin yüzölçümünün %2,8’inin kentsel alanlarla kaplı olduğu anlamına gelmektedir (Anonim, 2005).

19. yüzyılın sonlarından itibaren yerkürenin ortalama yüzey sıcaklığındaki artış nedeniyle küresel ısınma gittikçe önem kazanan bir konu olmaktadır. Kentleşme küresel ısınma açısından önemli bir etken durumuna gelmiştir (Chen ve ark., 2006). Kentlerdeki nüfus artışı ve insan faaliyetleri beraberinde kentlerdeki sıcaklık artışını getirmektedir. Kentleşmenin getirdiği olumsuz etkiler sonucunda, bu olumsuz etkilere karşı alınabilecek önlemlerden biri yeşil çatı sistemleri olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemler büyük kentlerde yeşil alan kazanım seçeneklerinden biri olarak değerlendirilebilirler (Hasdemir, 1993).

“Isı adası” terimi yapısal alanların yakınındaki kırsal alanlara göre daha sıcak olmasını tanımlamaktadır. Bu durum yaz aylarında enerji ihtiyacının artmasına, hava kirliliğine, sera gazı salınımlarının artmasına, sıcaklık nedenli hastalık ve ölümlerin oluşmasına ve su kirliliğinin artmasına neden olabilmektedir. Kentsel alanlarda oluşan ısı adası etkilerinin azaltılması ve kentte yaşayan insanların daha iyi bir çevrede yaşamasında en önemli bileşen yeşil dokudur. Bitkiler tarafından sağlanan gölgeleme, binanın soğutma yükünü azaltmakta ve bu sayede yapının kentsel ısı adası etkisine olan katkısını azaltmaktadır (Ong, 2003).

Yapılan çalışmalar, yeşil çatı sistemlerinin kentlerde kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasında önemli bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır (Takebayashi ve Moriyama, 2007; Susca ve ark., 2011; Ong, 2003). Bunun en önemli nedeni, bitki örtüsünün gölgeleme etkisiyle yüzeyde oluşan sıcaklığı azaltma özelliğidir

Kentlerdeki koyu ve geçirimsiz yüzeylerin ısınmasını önlemek için, bu yüzeylerin albedo (yansıtıcılık) etkisi artırılmasının yanı sıra yeterli toprak nemi ile birlikte vejetasyon örtüsünü artırarak evapotranspirasyonun oluşması sağlanabilmektedir (Obendorfer ve ark., 2007). Bu konuda yeşil çatılar kentlerde önemli bir işleve sahiptir. Bass ve ark. (2003), yaptıkları simülasyon çalışmasıyla Toronto kentindeki çatı yüzeylerinin %50'sinin yeşil çatılarla kaplanması sonucunda, kent merkezinde 2°C'lik bir sıcaklık düşüşü sağlanacağını tespit etmişlerdir.

Yeşil çatı sistemlerinin çatı üzerine gelen yağışı %40-80 arasında tutabilme potansiyeli bulunmaktadır. Ancak bu durum iklimsel özelliklere ve çatının yapısal sistemine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir (Fioretti, ve ark., 2010). Yeşil çatı sistemlerinin yüzey sel akışı azaltma özellikleri arasındaki farklar yeşil çatı sisteminin öznelitliğine ve hava koşullarına bağlıdır (Berndtsson, 2010).

Büyük miktardaki yağışlar sırasında, yeşil çatılar suyu katmanlarında depolamakta ve bu katmanlar suya doyduktan sonra kalan suyu drenaj şebekesine aktarmaktadırlar. Vanwoert ve ark. (2005) yapmış olduğu çalışmaya göre, yeşil çatıların çatı üzerine gelen yağışın %80'den fazlasını tutabilme özelliği bulunduğu ortaya konulmuştur. Connelly ve ark. (2005) 75 mm yetiştirme ortamına sahip, *Sedum* türleriyle bitkilendirilmiş bir yeşil çatı sisteminin su tutma kapasitesi yağışsız dönemde %86 – 94, yağışlı dönemde ise %13 – 18 arasında olduğunu tespit etmiştir. Bu durum yetiştirme ortamındaki nem miktarıyla ilişkilidir. Genel değerlendirmede ise, yeşil çatı sisteminin ortalama su tutma oranı %28 olarak ölçülmüştür. Bitkilendirmenin ise yetiştirme ortamı kadar su tutma kapasitesine etkisi bulunmamaktadır. Ancak vejetasyon transpirasyon özelliği nedeniyle bir gölge etkisi oluşturarak kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasında önemli bir role sahiptir (Fioretti ve ark., 2010).

## 1.2 Yeşil Çatı Sistemlerinin Ekolojik Döngüsü

Dünyada yeşil çatılarda kullanılan bitki türleri ile ilgili akademik çalışmaların başlangıcı, Kluge (1977) gerçekleştirmiş olduğu çalışma olarak kabul edilebilir. Bunun yanı sıra *Sedum* türlerinin kuraklığa dayanıklılığı dünyadaki çeşitli akademik çalışmalarla kanıtlanmıştır. Lasalle (1998) *Sedum album*'un yağış ya da sulama olmadan 100 gün hayatta kalabildiğini tespit etmiştir. Kirschstein (1997) *Sedum album*, *Sedum acre*, *Sedum kamtschaticum ellacombianum*, *Sedum pulchellum* "Michaux", *Sedum reflexum* ve *Sedum spurium* gibi türlerin tümünün 88 gün su istemeden yaşayabildiklerini tespit etmiştir (Getter ve Rowe, 2008). Teeri ve ark. (1986), ABD Chicago Üniversitesi'nde yaptıkları araştırmada, *Sedum rubrotinctum*'un 2 yıl boyunca su verilmeksizin yapraklarındaki turgor basıncında azalma olmadan yaşayabildiğini tespit etmiş ve Wolf ve Lundholm (2008) Kanada iklim şartlarında yaptıkları araştırmada bu bulguyu doğrulamıştır.

Yeşil çatı sistemlerde kullanılan bitki türlerinin, yeşil çatı üzerindeki zorlayıcı etkilere dayanabilmelerinin en temel nedeni özel bir metabolizma faaliyetidir. Kısaca CAM (Crassulacean Acid Metabolism) olarak tanımlanan fotosentetik faaliyet, farklı kaynaklara göre, ilk kez 1960 yılında 3 farklı bilim insanının 2 farklı çalışmasında ortaya konulmuştur. Bu kavram ilk olarak 1960 yılında Newcastle Üniversitesi Bitki Biyolojisi Bölümü'nden Ranson ve Thomas'ın (1960) yayınladıkları "Crassulacean Acid Metabolism" isimli eserde ortaya konmuştur. Ancak Lüttge (2004)'ye göre, Wolf'un Bitki Fizyolojisi Ansiklopedisi 12. sayısındaki "Der Diurnale Saurerhythmus" adlı bölüm yazısı, bu kavramın ortaya çıkışı olarak kabul edilmektedir.

Crassulaceae Asit Metabolizması" (CAM), sınırlı su varlığına karşı önemli bir fotosentetik karbon tutma adaptasyonudur ve genellikle gelişmiş su kullanma verimliliğiyle sonuçlanan, geceleyin CO<sub>2</sub>'in tutulması ve gün içerisinde tekrar CO<sub>2</sub>'in özümsemesiyle tanımlanabilir (Cushman ve Borland, 2002). Bu metabolizmaya sahip bitkiler, CO<sub>2</sub>'i geceleyin atmosferden alarak, bünyeleri içerisinde bulunan enzimlerin yardımıyla malik asit olarak saklamaktadırlar. Günün erken saatleri ve gün boyunca bitkiler enerji ihtiyaçlarını bu şekilde sağlamaktadırlar. Su kaybını engellemek için, gündüz olduğunda bitkiler stomalarını kapatarak, mevcut karbondioksiti enerjiye çevirmektedirler (Anonim, 2011a).

Yeşil çatıların bitkilendirilmesinde yaygın olarak kullanılan *Sedum* cinsi bitkiler Crassulaceae familyasına aittir. CAM metabolizmasına sahip 18,900 bitki türü, yeşil çatıların ihtiyaçlarını karşılayabilecek sınırsız

sayıda seçenek sunmaktadır (Tan ve Sia, 2009). Bu metabolizmaya sahip bitkileri içinde barındıran önemli familyalara örnek olarak, Crassulaceae, Aizoaceae, Cactaceae, Commelinaceae, Dracaenaceae, Lamiaceae, Piperaceae ve Portulacaceae familyaları gösterilebilir. Ülkemiz şartlarında doğal olarak yetişen bitki türlerinin yeşil çatı sistemlerinde kullanım olanakları ile ilgili araştırmalar ise sınırlıdır.

Çalışma kapsamında tesis edilen araştırma istasyonunda, ülkemizde bilimsel çalışmalar açısından yeni bir kavram olan yeşil çatı sistemlerinin çevresi ve üzerinde bulunduğu yapıyla olan ilişkileri, tipik bir ekstensif yeşil çatı sistemi ile referans çatı sistemi üzerinde yapılan ölçümler yardımıyla tespit edilmiş, bu sistemlerin yapıya sağladığı ısı yalıtımı, yapısal katmanlar içerisinde oluşan sıcaklık değişimleri, su tutma ve yüzeyel akış azaltım özellikleri değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile bina ve kent ölçeğinde önemli bir bileşen olan “yeşil çatılar” su ve enerji dengesi açısından araştırılmış ve İstanbul iklim koşullarındaki önemi analitik olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1 Araştırma Alanı

Araştırma alanı, İstanbul’un kuzey kesiminde, Bahçeköy – Sarıyer bölgesinde, Belgrad Ormanları’nın hemen yakınında, deniz seviyesinden 100 m. yukarıda yer almaktadır (Şekil / Figure 1). Deneme alanının konumu incelendiğinde, Doğu yönü yüksek şev ve ağaçlık alanla kaplıdır. Güney, Batı ve Kuzey Batı kesimleri ise meteorolojik etkenlere açıktır.



Şekil 1. Araştırma istasyonunun konumu (Anonim, 2011b)  
Figure 1. Location of research station (Anonim, 2011b)

Ilıman iklim kuşağı ile subtropikal iklim kuşağı arasında yer alan Türkiye, coğrafi konumu ve morfolojik özelliklerinden dolayı önemli ölçüde çeşitlilik gösteren bir iklim sistemine sahiptir. Yeşil çatı sistemlerinin sıkça kullanıldığı kuzey ülkelerindeki yağış rejimi ile ülkemiz koşulları farklılık göstermektedir. Bunun

yanında, araştırma istasyonunun bulunduğu konum İstanbul genelinden farklı bir karakter sergilemektedir. Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden elde edilen ve 1974 – 2004 yıllarını kapsayan 30 yıllık meteorolojik veriler incelendiğinde, araştırma istasyonunun bulunduğu bölgenin İstanbul'da kent içindeki bir ortama göre daha serin, nemli ve yağışlı iklim koşullarına sahip olduğu görülmektedir. İstanbul'un güney kesimleri genellikle Akdeniz iklimine yakın bir karaktere sahipken, bu durum kuzey kesimlerde "Karadeniz iklimi" olarak da bilinen iklim tipi tarafından değişime uğratılmaktadır (Ezber ve ark., 2007). Araştırma istasyonunun bulunduğu bölge mevsim normallerinde yıllık ortalama 1071 mm yağış almaktadır. Bu miktar yıllık ortalama 850 mm yağış ortalamasına sahip İstanbul'un genel ortalamasından yaklaşık 200 mm daha yüksektir. Yıllık ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde, Bahçeköy'ün yıllık ortalama hava sıcaklığının 12,8°C ile İstanbul genelinden (14,6°C) yaklaşık 2°C daha düşük olduğu görülmektedir.

Araştırma alanı olarak seçilen İ.Ü. Orman Fakültesi yerleşkesinde, arazi tesviyesi ile başlayan prefabrik bina yapımı süreci, bina temelini hazırlanması, binanın ana yapısının bitirilmesi, çatı tabyasının yapılması, dış sınır elemanlarının oluşturulması, elektrik ve su tesisatının döşenmesi ve dış kaplamasının bitirilmesi ile tamamlanmıştır. Yapı yığma sistemle tesis edilmiştir. Yapının duvarlar statik yük taşıma özelliği olan 20 cm. kalınlığında gaz beton elemanlar ile inşa edilmiştir. Çatı sisteminin üzerinde bulunduğu yapı kabuğu 15 cm kalınlığında beton tabakadan oluşmaktadır. Yapının iç bölümü çatı sistemleri ile aynı hizada olacak şekilde yalıtımlı bir kapı ile özdeş odalara ayrılmıştır. Yapının içerisinde ek bir ısıtma sistemi bulunmamaktadır.

Gerçekleştirilen ölçümler, 24 m<sup>2</sup>'lik çatı yüzeyine sahip olan deneme alanında kurulan yeşil çatı (YÇ) ve referans çatı (RÇ) sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme sahasının çatı sistemi %1 eğimli teras çatı sistemine uygun olarak düzenlenmiş ve çatı yüzeyi doğu-batı yönünde iki bölüme ayrılmıştır. 10,2 m<sup>2</sup> alana sahip bu alanlardan birine tipik bir ekstensif yeşil çatı sistemi kurulmuş, diğerine ise üzeri yeşil arduaz minerali kaplı su yalıtım örtüsü serilerek, referans çatı sistemi tamamlanmıştır (Şekil / Figure 2).



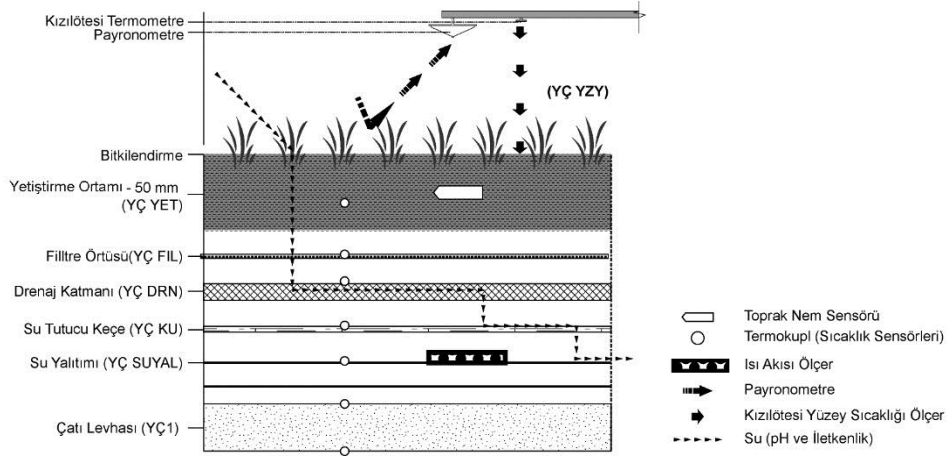
Şekil 2 Çatı yüzeyi  
Figure 2 Roof surface

Su yalıtımı her iki çatı yüzeyine iki kat uygulandıktan sonra, referans çatı olarak kullanılacak olan teras çatı, yeşil renkli arduvaz minerali kaplı su yalıtım örtüsü ile tamamlanmıştır. Yeşil çatı sistemini oluşturan yapısal katmanlar sırasıyla; 2 kat su yalıtım örtüsü, su tutucu keçe, drenaj katmanı, filtre örtüsü, 50 - 55 mm kalınlığında tuğla, kiremit kırığı ve organik maddeden oluşan bir bitki yetiştirme ortamıdır.

Yeşil çatı sisteminin bitkilendirilmesinde, dünyadaki ekstensif çatı bahçesi uygulamalarında yaygın kullanıma sahip olan *Sedum* türleri tercih edilmiştir. Yapılan akademik çalışmaların ve dünyada yeşil çatılarda en çok kullanılan türlerin belirlenmesi ve ülkemizde bu türlerin kullanılabilirliğiyle ilgili araştırmalar sonucunda, yeşil çatı üzerinde 3 farklı *Sedum* türünün kullanılmasına karar verilmiştir. Yeşil çatı sisteminin bitkilendirilmesinde *Sedum reflexum*, *Sedum spurium* "Album" ve *Sedum spurium* "Atropurpureum" türleri kullanılmıştır. Bitkiler köklü fideler halinde temin edilerek alana dikilmiştir.

## 2.2 Veri Toplama ve Değerlendirme

Çatı sisteminin üzerine, 2 adet kızılötesi sıcaklık ölçer (Optris CSmicro 2W, Optris GmbH, Berlin/Almanya, ölçüm hassasiyeti  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .) çatı yüzeyinden 100 cm yukarıda yer alacak şekilde, 3 adet piranometre (DeltaOhm LP PYRA 02, Delta OHM S.r.L., Padova – İtalya, ISO 9060) , 1 adet meteoroloji istasyonu (DeltaOhm HD2003 üç eksenli ultrasonik anemometre, Delta OHM S.r.L., Padova/İtalya, ölçüm hassasiyeti  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) çatı yüzeyinden 200 cm yukarıda yer alacak şekilde paslanmaz çelik meteoroloji direği üzerine monte edilmiştir. Çatı sistemlerinin katmanlarındaki ölçümler, termofitler (Comet PT1000 sensor, Comet System s.r.o., Roznov pod Radhostem/Çek Cumhuriyeti, ölçüm hassasiyeti  $\pm 0,25 - \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) ile gerçekleştirilmiştir. Yapı içerisindeki ölçümlerde ise, su toplama hazneleri, veri toplama cihazları (Comet MS5D, Comet System s.r.o., Roznov pod Radhostem/ Çek Cumhuriyeti) ve iç mekan sıcaklık - nem ölçüm aygıtları (Comet T3110, Comet System s.r.o., Roznov pod Radhostem-Çek Cumhuriyeti, ölçüm hassasiyeti  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ) kullanılmıştır. Yağış ölçümleri, devrilen kovalı yağışölçer (DeltaOhm, HD2013 Devrilen Kovalı Yağışölçer, Delta OHM S.r.L., Padova/İtalya, ölçüm hassasiyeti  $\pm \%2$ ) ile gerçekleştirilmiş ve yağışölçer çatı üzerine meteorolojik etmenlere açık bir konumda yerleştirilmiştir. Su hazneleri için su giderleri oluşturulmuş, bu haznelerde su kalitesi ölçümlerini gerçekleştirebilmek için gerekli montajlar yapılmıştır. Yüzeysel akışla ilgili detaylı verilere ulaşmak için yağışlı günler için 15 dakikalık verilerden elde edilen grafikler kullanılmıştır. Çalışmada 0 – 200 cbar aralığında ölçüm yapabilen bir toprak nem sensörü (Lufft, Almanya), yüzeyden 2 – 3 cm. derinde ve yatay konumda yerleştirilmiştir. Yetiştirme ortamındaki nem ölçümleri, santibar (cbar=0,01 bar) cinsinden kaydedilmiştir. Çatı sisteminin uygulaması ile eşzamanlı olarak çatı katmanları arasında ve üzerine çeşitli sensörler (algılayıcılar) yerleştirilmiş, ısı geçişini izlemek için gerekli olan ısı akısı ölçüm ve analiz sistemine ait plakalar da katmanlar arasında yerleştirilmiştir. Katmanlar arasındaki sensörlerin dizilişi Şekil / Figure 3’de gösterilmiştir. Kurulan deneme sahasında gözlem ve ölçümler 11 Kasım 2010 tarihinde başlamıştır. Yağışölçer ve toprak nem sensörünün kalibrasyon işlemlerinin de tamamlanmasıyla, deneme sahasındaki tüm ölçümler 9 Aralık 2010 tarihinde başlamıştır.



Şekil 3. Yeşil çatı katmanları arasında bulunan ölçüm cihazları  
Figure 3. Sensors in green roof layers

Çalışma sırasında, yeşil çatı sisteminde yapılan ölçümler yardımıyla sistemin iç dinamikleri incelenirken, karşılaştırmalı sonuçlar elde edebilmek amacıyla toplanan veriler referans çatı sisteminde yapılan ölçümlerle kıyaslanmıştır. Yeşil çatı sisteminin, çevresine ve yapının iç ortamına olan etkisi de bu çalışma ile ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Yeşil çatı sisteminin üzerinde bulunduğu yapı ve çevresiyle olan sıcaklık ilişkileri, bu sistemlerin kentsel ölçekteki katkılarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Çatı sistemlerinin yüzeyinde oluşan sıcaklık, çatı sistemlerinin alt katmanlarındaki sıcaklık değerlerini de etkilemektedir. Çatı sistemlerinin yalıtım özellikleri ve yapısal katmanlardaki sıcaklık dağılımları bu kapsamda incelenmiş, çevresel etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan karşılaştırmalı ölçümler ve bu ölçümlerden türetilen veriler yardımıyla, yeşil çatılar İstanbul iklim koşullarında kent ve bina düzeyinde değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, veri tiplerine göre Excel® ve Matlab® yazılımları yardımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, günlük (minimum, maksimum, ortalama) değerler ve aylık (minimum, maksimum, ortalama) değerleri içerecek şekilde değerlendirilmiştir.

### 3. BULGULAR

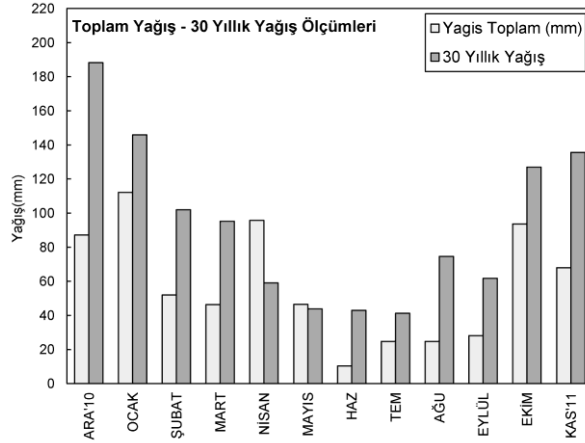
Çalışma sonucunda elde edilen veriler, meteorolojik veriler, çatı sisteminden elde edilen veriler ve yüzeysel akış ile ilgili veriler olarak 3 sınıfta incelenmiştir. Çalışma sırasında yapılan ölçümlerin genel değerlendirilmesi Tablo / Table 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm döneminde elde edilen verilerin genel değerlendirmesi  
Table 1. Review of findings during measurement period

Ölçülen Değer	Değer	Birim
Ölçüm Yapılan Gün Sayısı	382	Gün
Yağışsız Gün Sayısı	226	Gün
En Fazla Ardıışık Yağışsız Gün Sayısı	40	Gün
En yağışlı gün	04.05.2011	40,6
Toplam Yağış Miktarı	689,3	mm/m <sup>2</sup>
En Yüksek Günlük Ortalama Hava Sıcaklığı	25,9	°C
En Düşük Günlük Ortalama Hava Sıcaklığı	0,5	°C
Günlük Ortalama Hava Sıcaklığı	14,7	°C
En Yüksek Günlük Ortalama Yetişme Ortamı Sıcaklığı	35,5	°C
Günlük Ortalama Yetişme Ortamı Sıcaklığı	14,9	°C
En Düşük Günlük Ortalama Yetişme ortamı Sıcaklığı	0,4	°C
Yetişme Ortamındaki En Yüksek Ortalama Nem	8,1	cbar
Yetişme Ortamının Günlük Ortalama Nem Miktarı	93,9	cbar
Yetişme Ortamındaki En Düşük Ortalama Nem	200,0	cbar
En Yüksek Günlük Ortalama Rüzgar Hızı	15,0	km/saat
En Düşük Günlük Ortalama Rüzgar Hızı	4,4	km/saat
Yeşil Çatıda Oluşan Günlük Ortalama Isı Transferi	-2,1	w/m <sup>2</sup>
Referans Çatıda Oluşan Günlük Isı Transferi	-7,6	w/m <sup>2</sup>

#### 3.1 İklim Verileri

İklim verileri, her iki çatıdan tahliye olan suyun, yetişme ortamındaki nem miktarının ve çevresel iklim özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Çalışma sırasında ölçülen aylık toplam yağış değerleri, ölçüm döneminin iklim normallerine göre daha kurak geçtiğini göstermektedir. Aylık ölçümlerde, sadece 2011 yılı Nisan ve Mayıs aylarının mevsim normallerinden daha yağışlı geçtiği görülmektedir. Ölçüm dönemi boyunca kaydedilen toplam yağış miktarı (689,3 mm) iklim normallerine (1071 mm) göre %36 daha düşüktür (Şekil / Figure 4).

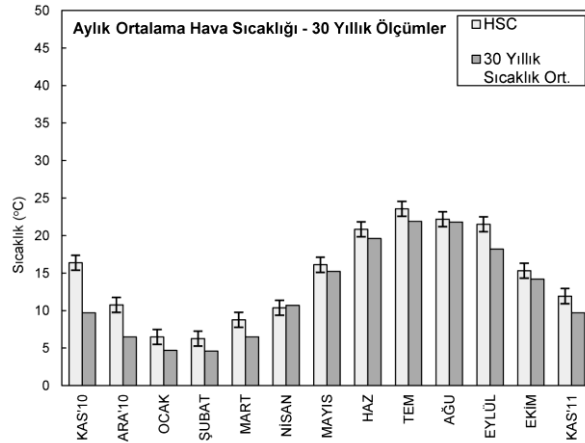


Şekil 4. Aylık ortalama yağış miktarının 30 yıllık verilerle karşılaştırılması  
Figure 4. Comparison of daily average precipitation and 30 year precipitation data

Çalışma döneminde Temmuz ayında 29, Ağustos ve Eylül aylarında ise 20'şer günlük yağışsız dönemler tespit edilmiştir.

Çalışma döneminde en uzun yağışsız dönem 12.08.2011 – 20.09.2011 tarihleri arasında tespit edilen 40 günlük dönemdir. En uzun ikinci ardışık yağışsız dönem ise 39 günle 03.07.2011 – 10.08.2011 tarihleri arasında tespit edilmiştir. Aralık, Şubat, Mayıs ve Eylül aylarında da 10 günün üzerinde ardışık yağışsız dönemler belirlenmiştir.

Çalışma sırasında en düşük günlük ortalama hava sıcaklığı 10 Mart 2011, en yüksek günlük ortalama hava sıcaklığı ise 20 Temmuz 2011 tarihinde ölçülmüştür. Çalışma sırasında mevsim normalleri ile ölçülen hava sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılabilmesi ve eşit tipte bir veri seti elde edilebilmesi amacıyla, her gün için 07.00, 14.00 ve 21.00 saatlerinin ortalamaları alınarak günlük sıcaklık ortalamaları elde edilmiştir. Bu verilerden türetilmiş aylık ortalama hava sıcaklığının, 30 yıllık sıcaklık verileriyle karşılaştırılması Şekil / Figure 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Aylık ortalama hava sıcaklığı ile 30 yıllık verilerin karşılaştırılması (HSC = Hava Sıcaklığı)  
Figure 5. Comparison of daily mean temperatures and 30 year data

Çalışma dönemindeki hava sıcaklığı iklim normallerinden daha yüksek seyretmiştir. Genel sıcaklık ortalaması incelendiğinde, çalışma dönemindeki hava sıcaklığının iklim normallerine göre 2,0°C daha sıcak olduğu görülmektedir. Çalışma döneminde 2010 yılı Kasım ve Aralık aylarında elde edilen hava sıcaklığı ölçümleri mevsim normallerinden belirgin şekilde farklılık göstermiş ve 4-7°C daha yüksek ölçülmüştür.



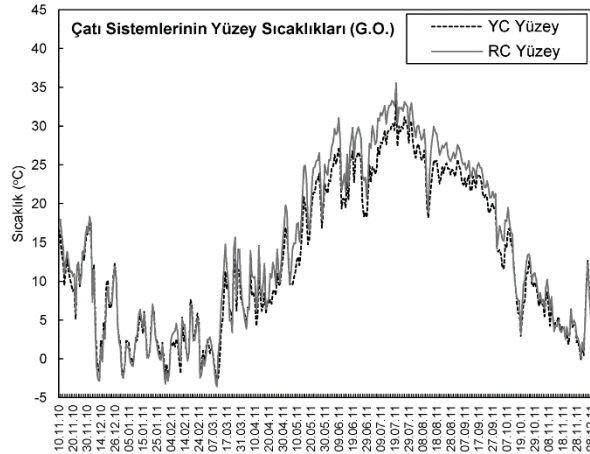
### 3.2 Çatı Sistemlerine Etki Eden Isı, Sıcaklık ve Çevresel Etmenler

Ölçüm döneminde çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık verileri ile ilgili istatistikler Tablo / Table 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri (°C)  
Table 2. Temperature values of roof layers

Kısaltma	Açıklama	Gün Sayısı	Günlük Ort.	St. Ort.	St. Sapma	Min.	Maks.
YÇ ODA	İç mekan (yeşil çatı altı)	382	15,7	0,4	7,3	3,4	28,7
YÇ1	Çatı levhası (yeşil çatı)	382	15,2	0,4	8,2	2,2	30,2
YÇ SU YAL	Su yalıtım katmanı	382	15,0	0,4	8,4	1,9	30,3
YÇ KU	Su tutucu keçe	382	15,0	0,4	8,5	1,7	31,1
YÇ DRN	Drenaj katmanı	382	14,7	0,5	9,1	1,0	33,2
YÇ FIL	Filtre örtüsü	382	14,6	0,5	9,1	0,8	33,1
YÇ YET	Yeşitleme ortamı	382	14,9	0,5	9,8	0,4	35,5
YÇ YZY	Yeşil çatı yüzeyi	382	12,9	0,5	9,6	-2,7	33,1
RÇ ODA	İç mekan (ref. çatı altı)	382	15,5	0,4	7,7	2,9	29,2
RÇ 1	Çatı levhası (re. çatı)	382	16,8	0,5	10,3	0,4	37,0
RÇ YZY	Ref. çatı yüzeyi	382	14,3	0,5	10,7	-3,6	35,5
HSC	Hava sıcaklığı	382	14,7	0,3	6,5	0,5	25,9

Yeşil çatının yüzey sıcaklığı en soğuk günde  $-2,6^{\circ}\text{C}$  ölçülürken, aynı gün referans çatının yüzey sıcaklığı  $-3,5^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. En sıcak günde ise, yeşil çatının yüzey sıcaklığı  $33,1^{\circ}\text{C}$ 'lik değere ulaşırken, referans çatının yüzeyi  $35,5^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür (Şekil / Figure 6). Genel ortalamada yeşil çatı yüzey sıcaklığı referans çatıdan  $1,4^{\circ}\text{C}$  daha düşük sıcaklık değerine sahiptir.



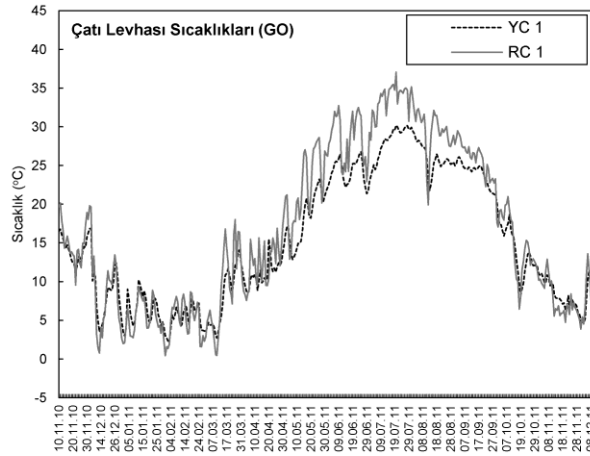
Şekil 6. Çatı sistemlerinin günlük ortalama yüzey sıcaklıkları (YC Yüzey = Yeşil çatının yüzey sıcaklığı, RC = Referans çatının yüzey sıcaklığı)

Figure 6. Daily mean surface temperature values of roof systems (YC Yüzey = Roof surface temperature of green roof, RC = Roof surface temperature of reference roof)

Çatı sistemlerinin aylık ortalama yüzey sıcaklıkları incelendiğinde, yüzey sıcaklıklarının kış aylarında birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Ancak yaz aylarında hava sıcaklığındaki artışla birlikte, referans

çatının yüzey sıcaklığı yeşil çatıya oranla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Yapının güneşlenme durumuna göre çatı yüzeyine gelen güneş ışınımının etkisiyle gün içerisinde öğlen 12:00 – 15:00 saatleri arasında yüzey sıcaklıkları en yüksek değerlere ulaşırken, en düşük değerler sabah 4:00 – 6:00 saatlerinde kaydedilmiştir. Çatı yüzey sıcaklıklarının mevsimlere göre dağılımları incelendiğinde, kış aylarında her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıkları yakın değerlerde ölçülürken, sonbahar, ilkbahar ve yaz aylarında farklar artmaktadır. Yeşil çatı sisteminin yüzey sıcaklığı sıcak aylarda referans çatı sistemine göre daha düşük sıcaklıklara sahiptir.

Çatı yüzeyinde oluşan sıcaklığın yapı kabuğuna olan etkisi, çatı sisteminin altında bulunan çatı levhası (yapısal tabaka) üzerindeki sıcaklık dağılımı ile belirlenmeye çalışılmıştır. Çatı levhasının dış etkenlerdeki değişimlerden etkilenme oranı, üzerinde bulunan çatı sisteminin ısı yalıtım etkisini belirlemektedir. Çatı sisteminin sağladığı yalıtım, çatının yapısal katmanlarında oluşacak ani sıcaklık değişimlerini düşürmekte ve bu malzemelerin kullanım ömrünü arttırmaktadır (Şekil / Figure 7).



Şekil 7. Çatı levhasının günlük ortalama sıcaklık değerleri (YC1=Yeşil çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı, RC1= Referans çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı)

Figure 7. Daily mean roof slab temperature values of roof systems (YC1 = Roof slab temperature under green roof, RC1 = Roof slab temperature under reference roof)

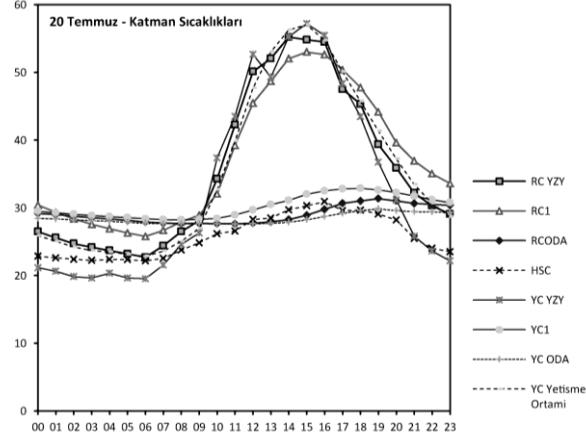
Günlük ortalamalar incelendiğinde, en soğuk günde (10 Mart 2011) hava sıcaklığı 0,5°C iken, yeşil çatının altındaki yapı yüzeyinin sıcaklığı 2,7°C olarak ölçülmüştür. Referans çatının altında bulunan yapı kabuğu ise hava sıcaklığı ile aynı sıcaklığa sahiptir(0,5°C).

Ölçüm döneminin en sıcak günü olan 20 Temmuz 2011 tarihinde, hava sıcaklığı 25,9°C olarak ölçülmüştür. Bu tarihte yeşil çatının altında bulunan çatı yüzeyinin sıcaklığı 30,2°C olarak ölçülürken, referans çatının altında bulunan yapı kabuğunun sıcaklığı 37°C olarak ölçülmüştür. En soğuk günde, yeşil çatının altında bulunan çatı yüzeyinin sıcaklığı referans çatıdan 2°C daha yüksekken, en sıcak günde 7°C daha düşüktür.

Elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde; hava sıcaklığının arttığı dönemde, yeşil çatı sisteminin yüzeyde oluşan sıcaklığı alt katmanlara geçişi sırasında azalttığı görülebilmektedir. Hava sıcaklığının düşük olduğu sonbahar ve kış aylarında; yeşil çatı sistemi alt katmanları düşük sıcaklıklardan korumuştur. Referans çatı sisteminin altında bulunan yapı kabuğunun sıcaklık değerlerinde ise dış ortam koşullarına bağlı olarak belirgin dalgalanmalar kaydedilmiştir. Karşılaştırmalı ölçümler sonucu, yeşil çatı sisteminin yüzeyde oluşan sıcaklığın alt katmanlara geçişini referans çatıya oranla %80'e varan oranda azalttığı ve yapı kabuğunu şiddetli sıcaklık değişimlerinden koruduğu tespit edilmiştir.

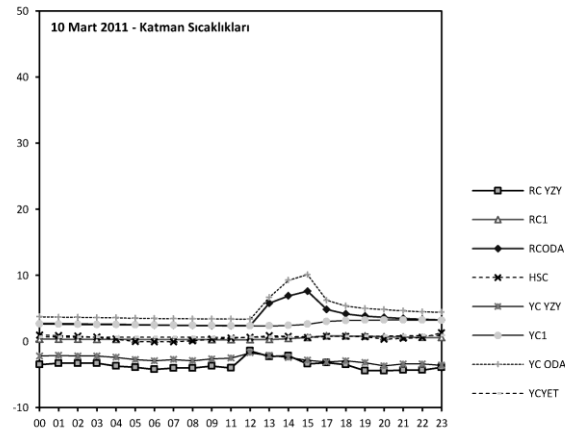
Çalışma sırasında en düşük günlük ortalama hava sıcaklığı 10 Mart 2011, en yüksek günlük ortalama hava sıcaklığı ise 20 Temmuz 2011 tarihinde ölçülmüştür. En sıcak gün olan 20 Temmuz 2011 tarihinde, gün içerisindeki en yüksek sıcaklık saat 16.00'da 30,9°C olarak ölçülmüştür. Aynı saatte çatı katmanlarından elde edilen en yüksek değer, 55,4°C ile yeşil çatının yüzey sıcaklığı olmuştur. Çatı katmanlarından gün

içerisinde ölçülen en yüksek değer  $57,2^{\circ}\text{C}$  ile yeşil çatının yüzey sıcaklığına aittir. Bu tarihte en yüksek ikinci sıcaklığa sahip katman ise referans çatı yüzey sıcaklığıdır( $55,2^{\circ}\text{C}$ ). Gün içerisinde çatı sistemlerinde oluşan sıcaklık dağılımı incelendiğinde, yeşil çatının yüzey sıcaklığının en yüksek değere ( $57,2^{\circ}\text{C}$ ) ulaştığı anda, yeşil çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı  $32,0^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür (Şekil / Figure 8).



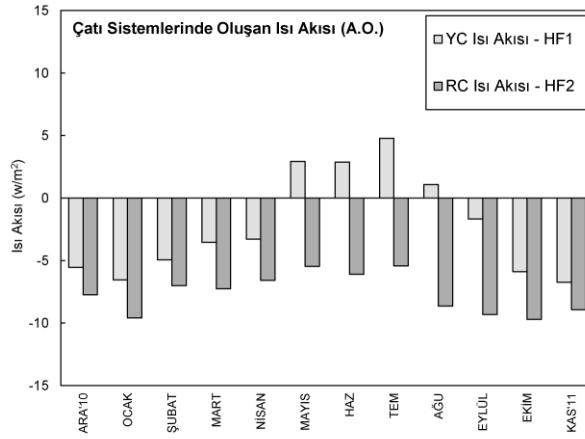
Şekil 8. En sıcak gün içerisinde çatı katmanlarında oluşan sıcaklık dağılımları  
Figure 8. Temperature distribution in roof layers on hottest day

Çalışma sırasında günlük ortalama hava sıcaklığının en düşük değere sahip olduğu gün olan 10 Mart 2011 tarihinde, gün içerisindeki en düşük sıcaklık sabah saat 07.00'de  $0,5^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Aynı saatte referans çatının yüzey sıcaklığı  $-4,0^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşmüştür. En düşük ikinci sıcaklığa sahip katman ise  $-2,7^{\circ}\text{C}$ 'yle yeşil çatının yüzey sıcaklığı olmuştur. Çatı yüzeylerindeki düşük sıcaklıklar, alt katmanlarda farklı sıcaklık dağılımlarına yol açmıştır. Yeşil çatının yüzey sıcaklığındaki düşüş ya da artışlar, altında bulunan katmanlara etki etmemiş ve yeşil çatının altında bulunan yapı levhasının sıcaklığı gün içerisinde  $2,5 - 3^{\circ}\text{C}$  arasında ölçülmüştür. Referans çatının altında bulunan yapı yüzeyinin sıcaklığı ise gün boyunca  $0,3 - 0,8^{\circ}\text{C}$  arasında ölçülmüştür (Şekil / Figure 9).



Şekil 9. En soğuk gün içerisinde çatı katmanlarında oluşan sıcaklık dağılımları  
Figure 9. Temperature distribution in roof layers on coldest day

Her iki çatı sistemi ısı verimliliği açısından değerlendirildiğinde, ölçüm dönemi içerisinde, yeşil çatıdan iç mekana transfer olan ısı miktarı Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında “+” değerlerde kaydedilirken, referans çatıdan devamlı bir ısı kaybı tespit edilmiştir. Ancak çatı sistemlerinde oluşan ısı transferi değerlerinin, iç mekan sıcaklık ölçümlerine belirgin bir etkisi tespit edilememiştir. Yeşil çatı sistemi, referans çatıya oranla genel ortalamada %77 oranında ısı verimliliği sağlamıştır. Ancak yaz aylarında yeşil çatı sisteminde nem varlığının azalması, ısı yalıtım özelliğini de azaltmıştır. Her iki çatı sisteminde oluşan aylık ısı akısı miktarları Şekil / Figure 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Aylık ortalama ısı akısı miktarı (YC, RC Isı akısı = Çatı sisteminden yapıya doğru oluşan ısı akısı.

“+” değerler yapıya giren ısı miktarını, “-“ değerler ise yapıdan çıkan ısı miktarını ifade etmektedir.)

Figure 10. Monthly average heat flux values (YC, RC Isı akısı = Heat flux through roof systems.

“+” values represents heat flux into the building, “-“ values represents heat flux throughout the building)

Ardışık yağışsız gün sayısındaki farklar, yetiştirme ortamı nemi ortalamasında önemli bir farklılık oluşturmuştur. Şubat ve Mart ayları için, aylık yetiştirme ortamı nemi ortalamasını etkileyen en önemli parametrenin ardışık yağışsız gün sayısı olduğu görülmektedir. Diğer aylarda ise, yetiştirme ortamının nem değerinde, hava sıcaklığı ve yağış miktarına bağlı olarak tutarlı bir değişim söz konusu olmuştur. Çalışma sırasında, en uzun yağışsız dönem 40 günle 12 Ağustos 2011 – 20 Eylül 2011 tarihleri arasında tespit edilmiştir. İkinci en uzun yağışsız dönem ise 3 Temmuz – 10 Ağustos tarihleri arasındaki 33 günlük yağışsız dönemdir (Tablo / Table 3).

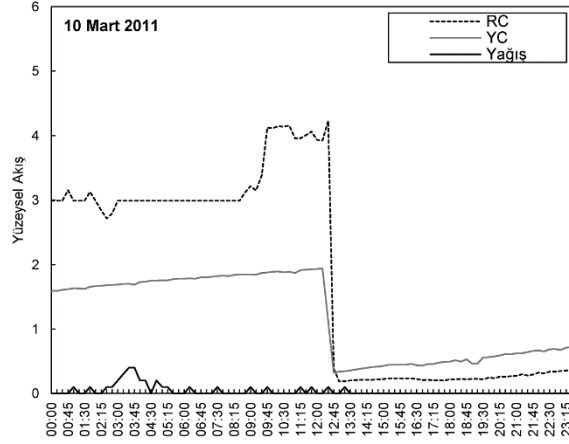
Tablo 3. Aylara göre toplam yağış, ortalama yetiştirme ortamı nemi, ardışık yağışsız günler  
Table 3. Monthly total precipitation, mean soil moisture and consecutive days without rain

AYLAR	Yağış Toplam (mm)	Toprak Nemi (cbar)	Ardışık Yağışsız Günler
Aralık 2010	87,2	13,8	12
Ocak	112,1	14,1	8
Şubat	52,0	49,4	14
Mart	46,3	33,4	5
Nisan	95,7	31,7	6
Mayıs	46,5	142,5	22
Haziran	14,2	200,0	12
Temmuz	24,7	183,5	29
Ağustos	24,7	173,1	20
Eylül	28,1	196,5	20
Ekim	93,6	40,1	8
Kasım 2011	68,0	28,6	5

Çalışma sırasında kullanılan ölçüm sisteminde, su hazneleri belirli bir seviyeye kadar su alabilmektedir. Dolayısıyla çatı sistemlerinden tahliye edilen su miktarı grafiklerinde, tahliye edilen su miktarı su haznelerinin kapasitelerine bağlı olarak belirlenebilmiştir. Aynı zamanda seviye sensörlerinin ölçüm hassasiyetleri de bu durumda etkili olmuştur. Ancak elde edilen veriler çatı sistemlerinden tahliye olan anlık

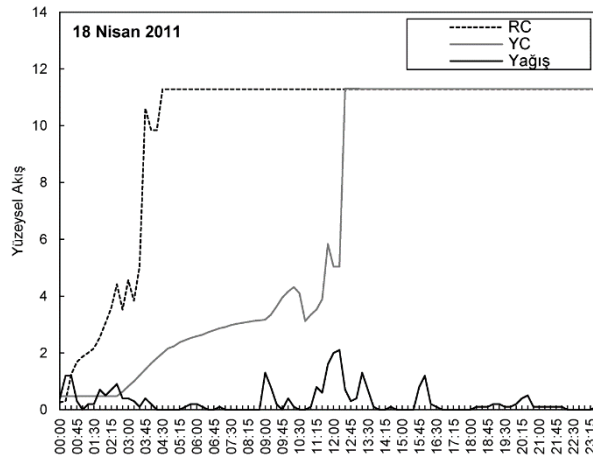
su miktarı ve hızı hakkında bilgi sahibi olmak için yeterlidir. Rastgele seçilen yağışlı günlerde yapılan ölçümler, çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

Toplam yağış miktarı 3,3 mm olan 10 Mart 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil / Figure 11'de gösterilmiştir. Bu tarihte kar yağışı olması nedeniyle, çatılardan tahliye edilen su, eriyen kar miktarı olarak tespit edilmiştir. Yeşil çatı sistemi çatı üzerinde eriyen kar örtüsünün oluşturduğu yüzeysel akışı %36,1 oranında düşürmüştür.



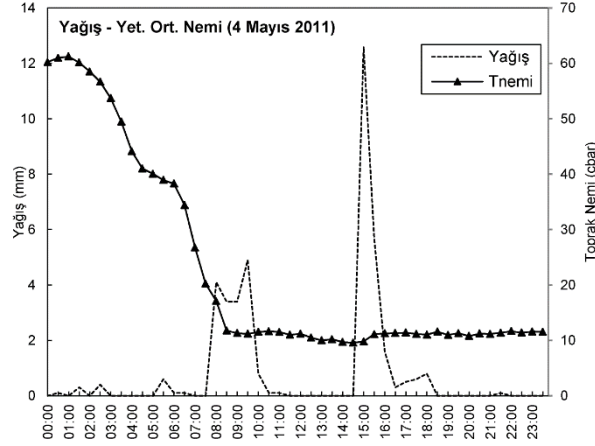
Şekil 11. yağış ve yüzeysel akış grafiği - 10 Mart 2011 (RC= Referans çatı, YC=Yeşil çatı, Yağış=Yağış miktarı)  
Figure 11. Precipitation and runoff graph – 10 March 2011 (RC= Reference roof, YC=Green roof, Yağış=Precipitation)

Toplam yağış miktarı 27,4 mm olan 18 Nisan 2011 tarihinde, referans çatı sisteminden yağışın başlamasıyla su tahliyesi görülmüştür ve çok kısa bir sürede en üst seviyeye ulaşmıştır. Yeşil çatı sisteminden tahliye edilen su miktarı ise 9 saat içerisinde en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yağış sırasında yeşil çatı sistemi yüzeysel akışın oluşmasını ertelemekle birlikte, sistemden tahliye edilen suyun %32,8'inin yüzeysel akışa geçmesini engellemiştir (Şekil / Figure 12).



Şekil 12. yağış ve yüzeysel akış grafiği - 18 Nisan 2011 (RC= Referans çatı, YC=Yeşil çatı, Yağış=Yağış miktarı)  
Figure 12. Precipitation and runoff graph – 18 April 2011 (RC= Reference roof, YC=Green roof, Yağış=Precipitation)

4 Mayıs 2011 tarihindeki şiddetli yağış sırasında su hazneleri yağışın kesildiği saatlerde boşaltılarak tahliye edilen su miktarının izlenmesi sağlanmıştır. Yeşil çatı sistemi ilk yüksek yağış dalgasında çatı sisteminden tahliye edilen suyun yüzeysel akışa geçmesini 1 saat ertelemiştir. İkinci şiddetli yağışta ise, yeşil çatı sistemindeki su doymunluğu sebebiyle, çatı sistemleri benzer bir yüzeysel akış karakteri göstermişlerdir. Toplamda yeşil çatı sistemi oluşan yüzeysel akışı %25 oranında düşürmüş ve 1 saat geciktirmiştir (Şekil / Figure 13).



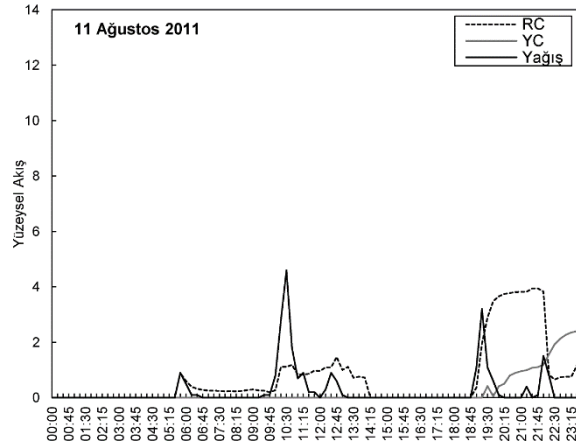
Şekil 13. yağış ve yüzeysel akış grafiği – 4 Mayıs 2011 (Yağış = Yağış, TNemi=Yetiştirme ortamındaki nem miktarı)  
Figure 13. Precipitation and runoff graph – 4 May 2011 (Yağış = Precipitation, TNemi=Substrate moisture)

Yağışın başlamasıyla yetiştirme ortamındaki nem miktarı artmaya başlamış ve günün 8. saatinde yetiştirme ortamındaki nem oranı en yüksek seviyesine gelmiştir. Yeşil çatı sisteminin yetiştirme ortamı ve su biriktirici katmanları doymuşluğa ulaşana kadar yeşil çatıdan su tahliyesi olmamıştır. Yetiştirme ortamındaki nem oranının doymuşluğa ulaştığı 8. Saatten itibaren yeşil çatı sisteminden tahliye olan su miktarı yüzeysel akış grafiğinde de görüldüğü gibi artışa geçmiştir ve referans çatı sisteminin su tahliye miktarına ulaşmıştır.

Çalışma sırasındaki ölçümlerde, 2 Temmuz - 11 Ağustos 2011 tarihleri arasında 39 günlük bir kurak dönem tespit edilmiştir. Çalışma sırasındaki en sıcak dönem olarak belirlenen bu dönem içerisinde, yeşil çatı sistemindeki nem miktarı ciddi bir düşüş göstermiştir. Bu dönemin bitişinde 24,6 mm'lik şiddetli bir yağış kaydedilmiş ve çatı sistemlerinin tepkilerinin belirlenmesi amacıyla yüzeysel akış grafikleri oluşturulmuştur (Şekil / Figure 14).

39 günlük kurak dönem sırasında oluşan su açığı nedeniyle oluşan yağış referans çatı sisteminden yağışla paralel bir şekilde tahliye edilirken, yeşil çatı sisteminden 14 saat boyunca su tahliyesi tespit edilmemiştir. Yeşil çatı sistemi yüzeysel akışı %67 oranında düşürmüştür.

6



Şekil 14. Yağış ve yüzeysel akış grafiği – 11 Ağustos 2011 (RC= Referans çatı, YC=Yeşil çatı, Yağış=Yağış miktarı)  
Figure 14. Precipitation and runoff graph – 11 August 2011 (RC= Reference roof, YC=Green roof, Yağış=Precipitation)

Oluşan kurak dönem sonucunda, çatının alt katmanlarının da suya doymasıyla, yeşil çatı sistemi ancak yağış başladıktan 14 saat sonra fazla suyu tahliye etmiştir. Elde edilen verilere göre, yeşil çatı sistemi 24

mm/m<sup>2</sup> yağışın 20 mm/m<sup>2</sup>'lik bölümünün yüzeysel akışa geçmesini engellemiştir. Bu rakam, çatı yüzeyiyle birlikte düşünüldüğünde, 200 mm (200 lt.) su miktarına eşittir.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışma ile yeşil çatı sistemlerinin İstanbul iklim koşullarında su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Yeşil çatı sistemleri araştırma alanında yapılan ölçümler yardımıyla İstanbul kenti ölçeğinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışma dönemini kapsayan 5 yıllık süreçte, yeşil çatı sistemleriyle ilgili yapılan literatür taramalarının yanı sıra, bu sistemlerle ilgili mikro ve makro ölçekte yapılan araştırmalar incelenmiş, araştırma sahasının verimli işleyişi için detaylı bir çalışma yürütülmüştür. Yapılan ön denemeleri takip eden süreçte, kapsamlı bir araştırma istasyonu tesis edilmiştir.

Ölçüm dönemi olan 2010 – 2011 yılları Kasım ayları arasındaki ortalama hava sıcaklığı ölçümleri, 30 yıllık ortalama değerlerin 2,1°C üzerinde kaydedilmiştir. Bu dönem içerisinde özellikle 2010 yılının Kasım ve Aralık ayları ile 2011 yılının Eylül ve Kasım aylarındaki hava sıcaklığı değerlerinde önemli farklılıklar tespit edilmiş ve bu değerler normal değerlerin 3-7°C üzerinde seyretmiştir.

Ölçüm dönemindeki yağış miktarı 30 yıllık değerlere göre belirgin bir farklılığa sahiptir. Yapılan ölçümler 2011 yılının Nisan ayının diğer yıllardan daha yağışlı geçtiğini ancak yağış miktarının genel ortalamada belirgin bir biçimde azaldığını göstermektedir. Ölçüm döneminde 2011 yılının Mayıs ayında mevsim normallerine yakın bir yağış değeri ölçülmüş, diğer aylarda ise yağış miktarında %20 – 70 arasında bir azalma kaydedilmiştir. Ölçüm dönemini kapsayan dönemde 30 yıllık ortalama değerlere göre toplam yağış miktarı 1071 mm iken, çalışma sırasında ölçülen yağış miktarı 713,5 mm/m<sup>2</sup> olmuştur. Ölçüm dönemi boyunca kaydedilen toplam yağış miktarı, mevsim normallerinin %43'ü kadardır. Yapılan ölçümler, çalışma döneminin mevsim normallerine göre daha kurak ve sıcak geçtiğini göstermektedir.

Çatı sistemlerinde oluşan sıcaklık dağılımı, kentsel ölçekte ve yapısal açıdan değerlendirme kapsamına alınmıştır. Dünyada yeşil çatı sistemlerinin yapı kabuğunu ve su yalıtım örtüsünü dış ortam şartlarından koruması açısından incelenmesini amaçlayan akademik çalışmalar bulunmaktadır. Yapı kabuğu ve su yalıtım örtüsünün uzun yıllar sağlam bir biçimde korunabilmesi açısından, çatı sisteminde oluşan sıcaklık dağılımları önem taşımaktadır.

Alexandri ve Jones (2008) bitkilendirilmiş çatılarla kaplı bir kent yüzeyinin sıcaklığının en fazla 26°C ve ortalama 12,8°C'ye kadar düşürülebileceğini ve yüzey sıcaklığındaki düşüşlerin sıcak ve kurak iklimlerde daha yüksek miktarda görüldüğünü bildirmektedir. Liu ve Baskaran'ın (2003) Kanada Ottawa'da yapmış olduğu çalışmada, yeşil çatı ve referans çatı sistemlerinin ısı performansları 660 günlük bir ölçüm döneminde incelenmiştir. Ölçüm döneminde, referans çatının su yalıtım örtüsünün sıcaklığı (çatı levhası) 660 günlük ölçüm döneminin 342 günü 30°C'nin üzerinde, 219 günü 50°C'nin üzerinde, 89 günü 60°C'nin üzerinde ölçülmüştür.

Spala ve ark. (2008) Yunanistan iklim koşullarında yeşil çatı sistemlerinin yaz aylarında binaların soğutma ihtiyacını %40'a varan oranda azalttığını belirlemiştir. Benzer biçimde, Sailor (2007) ve Niachou ve ark. (2001) oluşturdukları matematiksel model yardımıyla yeşil çatı sistemlerinin binalarda ısıtma ve soğutma giderlerini düşürdüğünü ve belirgin bir ısı yalıtımı sağladığını belirlemiştir. Alexandri ve Jones (2008) yaptıkları değerlendirmede yeşil çatı sistemlerinin üzerinde bulunduğu yapıya %32 ile %100 arasında değişen oranlarda enerji tasarrufu sağladığını tespit etmiştir.

Çalışma sırasında elde edilen sıcaklık dağılımlarına göre özellikle yaz aylarında yeşil çatı sisteminin yapı kabuğunu dış ortamda oluşan etkilerden korumuş olduğu görülmektedir. Referans çatının yüzey sıcaklığı 28 gün boyunca 30°C'nin üzerinde sıcaklığa ulaşırken, yeşil çatının yüzeyinin 30°C'nin üzerinde ölçüldüğü gün sayısı 7 günle sınırlı kalmıştır. Aynı şekilde yeşil çatının altında bulunan yapı levhasının sıcaklığı sadece 3 gün 30°C'nin üzerinde ölçülürken, referans çatının altında bulunan yapı levhasının sıcaklığı 56 gün 30°C'nin üzerinde ölçülmüştür. Kış aylarında ise çatı sistemleri benzer bir sıcaklık dağılımına sahiptir.

Çatı sistemlerinden elde edilen sıcaklık dağılımı Liu ve Baskaran (2003) yapmış olduğu çalışmayla benzer özellikler göstermiştir. Yeşil çatı sisteminin yapı kabuğuna getirmiş olduğu koruyucu etkiyle ilgili benzer sonuçlar, çalışma sonuçlarında da ortaya konulmuştur. İklimsel özellikler nedeniyle, çatı sistemlerinde tespit 55°C'nin üzerindeki sıcaklıklar, çalışma sırasında tespit edilmemiştir.

Çatı sistemlerinde oluşan sıcaklık dalgalanmaları (salınımları) incelendiğinde, günlük döngü hesaplamalarında elde edilen minimum ve maksimum değerler farkları Teemsuk ve Mander'in (2008) Estonya ikliminde yapmış olduğu çalışmayla örtüşmektedir. Yeşil çatının yüzeyindeki ısınma-soğuma döngüsündeki keskin farklılıklar beklenmeyen bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Yeşil çatı sisteminin yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimi (ay içerisindeki min-maks. değerler farkı) 5,0–27,4°C arasında ölçülürken, referans çatıda oluşan sıcaklık değişimi ise 6,8 – 26,1°C olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde Teemsuk ve Mander'in (2009) araştırmasında elde edilen bulgulara benzer olarak, yeşil çatının yüzeyinde oluşan gün içerisindeki sıcaklık farkları 40°C'ye kadar ulaşmıştır. Çatı sistemlerinin altında bulunan çatı levhasında oluşan sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise, yeşil çatı sisteminin yalıtım etkisi ortaya konulabilmektedir.

Yeşil çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasında oluşan sıcaklık dalgalanmaları 1,0-3,7°C ile arasında ölçülmüştür. Referans çatının altında bulunan çatı levhasındaki sıcaklık dalgalanmaları ise (ay içerisindeki min-maks. değerler farkı) 5,5-22,8°C arasında değişmiştir. Dünyadaki akademik çalışmalara benzer bir şekilde, yeşil çatı sistemi, hava sıcaklığındaki sıcaklık değişimlerinin çatı levhasına olan etkisini %35-77 oranında azaltmış ve oldukça durağan bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır.

Dünyada yapılan akademik çalışmalar yeşil çatı sistemlerinin kentlerdeki yüzeysel akışı azaltmada belirgin rolleri olduğunu ortaya koymaktadır. Gregorie ve Clausen'in (2011) gerçekleştirdikleri araştırma, %75 oranında genleştirilmiş şist, %10 perlit, %15 komposttan oluşan 10,2 cm'lik yetiştirme ortamına sahip modüler yeşil çatı sisteminin ABD Connecticut iklim şartlarında çatı yüzeyine gelen yağışın %41,6'sını bünyesinde tutabildiğini ortaya koymuştur.

Vanwoert ve ark. (2005), ABD Michigan eyaletinde gerçekleştirdikleri çalışmada, yeşil çatıların çatı üzerlerine gelen yağışın %80'den fazlasını tutabilme özelliği olduğunu tespit etmiştir. Scholz-Barth (2001)'e göre genel ortalama tipik bir ekstensif yeşil çatı sistemi, çatı üzerine gelen yağışın %75'ini tutmakta, %25'ini ise çatı sisteminden tahliye etmektedir. Hilten ve ark. (2008) gerçekleştirmiş olduğu modelleme çalışması, yeşil çatı sistemlerinin 2,54 mm/m<sup>2</sup>'den daha düşük yağışlarda oldukça verimli sistemler olduğunu ve bu miktardan daha düşük yağışlarda yüzeysel akışın oluşmadığını ortaya koymuştur.

Mentens ve ark. (2006) yeşil çatı sistemlerinin yüzeysel akış özelliklerini deneysel olarak araştırmış olan 18 adet araştırmayı incelemiştir. Bu araştırmada, yeşil çatı sistemlerinin yüzeysel akış özelliklerinin yetiştirme ortamının derinliğiyle kuvvetli bir ilişkisinin olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda, yetiştirme ortamındaki nem miktarının artmasıyla, yeşil çatı sistemlerinin su tutma kapasitelerinin kış aylarında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yeşil çatı sistemlerinin kentlerdeki yüzeysel akışın tümünü yok etmesinin mümkün olmadığı çalışmada özellikle üzerinde durulan bir konudur. Yeşil çatılar, kentlerdeki yeşil alanlar ile su depolayabilen altyapı sistemlerine destek niteliğinde kullanılması gereken sistemlerdir.

Çalışma sırasında referans çatı olarak ayrılan bölümün su tutma özelliği tespit edilememiş olmakla birlikte, Berhage ve ark. (2009) yapmış oldukları çalışmada, bitümlü membranla kaplı çatıların dahi çatı yüzeyine gelen yağışın %14'ünü tutabildiğini ortaya koymuştur.

Villareal ve Bengtsson (2005) İsveç Malmö'de *Sedum album* ile bitkilendirilmiş 4 cm yetiştirme ortamına sahip bir yeşil çatı sistemi üzerinde yaptıkları denemelerde, tekdüze bir yağış sırasında yeşil çatı sistemi kuru durumdayken, 6-12 mm'lik bir yağışın yüzeysel akış oluşturmaya yeterli olduğunu tespit etmişlerdir.

Gregorie ve Clausen (2011) ile Dunnett ve ark. (2008) araştırmalarında kullanmış oldukları yetiştirme ortamı derinlikleri, çalışmada kullanılan yetiştirme ortamından daha derindir. Ayrıca bu yetiştirme ortamları karakter olarak çalışmada kullanılan yetiştirme ortamından farklıdır. Ancak ortak bir değerlendirmede, yeşil çatıların çatı yüzeyine gelen yağışın yüzeysel akışa geçmesini engelleme oranı %13-80 arasında değişen oranlarda



ölçülmüştür. Ayrıca yeşil çatı sistemlerinin yüzeysel akışa geçmesi beklenen yağışı 1-10 saat arasında erteleyebildikleri de tespit edilmiştir. Carter ve Rasmussen (2006) ABD Georgia Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri çalışmada yeşil çatı sistemlerinin 2,54 mm'den düşük yağışlarda, çatı yüzeyine gelen yağışın %90'ını, 7,62 mm'den büyük yağışlarda ise, bu yağışların %50'sini tutabilme özelliğini tespit etmişlerdir.

Çalışma sırasında, yeşil çatı sistemi yağışın başladığı andan itibaren, yetiştirme ortamındaki su miktarına bağlı olarak yüzeysel akışa geçecek ya da çatıdan drenaj ortamına iletilecek su miktarını 1 ile 23 saat arasında geciktirmiş ve yüzeysel akışa geçecek su miktarını %20 - %100 oranında azaltmıştır. Bunun yanı sıra çalışmada kullanılan yeşil çatı sistemi, yetiştirme ortamı şartlarına ve yağış tipine bağlı olarak 4 mm/m<sup>2</sup>'den küçük yağışlarda yüzeysel akış oluşmasını engellemiş, daha büyük yağışlarda ise çatı sisteminden tahliye olan su miktarının yüzeysel akışa geçmesini geciktirmiştir.

38 günlük ardışık yağışsız dönemin ardından 11 Ağustos 2011 tarihinde ölçülen 24,2mm yağışta, yeşil çatı sistemi bu yağışın 20 mm yağışı bünyesinde tutmuştur. Bu rakam 10,2 m<sup>2</sup>'lik çatı yüzeyi de dikkate alındığında 204 mm'lik bir su kütlelerine denk gelmektedir. Bu değer 204 kg su ya da 204 lt. su miktarına denktir. Benzer ölçümler 30 Eylül 2011 tarihinde yapılmış, yeşil çatı sistemi 22,1 mm yağışın 17,5 mm bünyesinde biriktirmiştir. Çatı sisteminden oluşan yüzeysel yağış yetiştirme ortamının su tutma kapasitesi ile ilgili olduğu için, yetiştirme ortamının nem değeri arttıkça, yeşil çatıdan tahliye edilen suyun miktarı artmaktadır. Ancak yetiştirme ortamı neminin en doygun durumunda dahi, yeşil çatı sistemi üzerine gelen yağışın yüzeysel akışa geçmesini 1 ile 14 saat arasında geciktirmiştir.

Yetiştirme ortamının derinliğinin artması ve yetiştirme ortamına su tutma kapasiteleri yüksek bileşenlerin eklenmesiyle, yeşil çatıların su tutma kapasitesinin arttırılabileceği ortadadır. Kuvvetli bir yağışın kentteki çatı yüzeylerinde toplanarak, bu suyun yüzeysel akışa geçmesi ya da kanalizasyon sistemine ulaşması kentsel ölçekte bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Tahliye edilen suyun yeşil çatı tarafından drenajının geciktirilmesi ve/veya tamamının çatıda tutulması, kentlerdeki birçok yapının çatılarında yeşil çatı sistemlerin kullanılmasıyla önem kazanacak bir uygulamadır.

Çalışma sırasında, yetiştirme ortamındaki nem değişimi özellikle yaz aylarında oldukça hızlı bir biçimde gerçekleşmiştir. Yetiştirme ortamı, yaz aylarında oluşan evaporasyon ile birlikte, bünyesindeki su varlığını 7-9 gün içerisinde kaybetmiştir. Yapılan gözlemlerde, bitkilerin CAM metabolizmalarını kullanarak hayatta kalmalarının yanında, çatı sisteminde depolanan ve hava sıcaklığıyla buharlaşan sudan da faydalandıkları görülmüştür.

Ekosistem içerisinde insan yaşayışının çevreye getirdiği olumsuz etkiler, bu durumda en büyük paya sahip olan yerleşme olgusunun yeniden ele alınmasını sağlamıştır. Çalışma sırasında İstanbul iklim şartlarında oluşturulacak yeşil çatı uygulamalarının iklim ve kent düzeyindeki olumlu katkılarının, İstanbul'daki yapılar üzerinde oluşturulmasının desteklenmesi fikri ortaya çıkması olasıdır. Ayrıca dünyada ortaya çıkan yeşil bina değerlendirme programlarında özellikle vurgulanan yerellik ve sürdürülebilirlik kavramları, ülkemizin özellikle kırsal bölgelerinde yıllardır süregelen yaşam tarzı ile örtüşmektedir. Dolayısıyla ülkemizin bu tip çevresel politikaları geliştirme ve uygulama açısından çeşitli olanaklara sahip olduğu ortadadır.

Çalışma sırasında mümkün olan en sık yetiştirme ortamı ile oluşturulan yeşil çatı sisteminde bitkilerin hayatta kalması önem taşıyan bir bulgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak yetiştirme ortamındaki hızlı su kaybı ve kurak dönemlerde oluşan keskin sıcaklık salınımı olumsuz bir faktördür. Yetiştirme ortamının kalınlığının artması, yeşil çatı sisteminin su tutma kapasitesini ve yüzeysel akış oluşumunu geciktirmekle birlikte, evaporasyon hızını da düşürecektir. Daha kalın bir yetiştirme ortamı, bitkilerin kök gelişimini de rahatlatarak, çatı yüzeyindeki bitki örtüsünün kaplama oranını da arttıracaktır.

Sonuç olarak, çalışmada elde edilen veriler yardımıyla, tipik bir ekstensif yeşil çatı sisteminin İstanbul şartlarında sürdürülebilir bir seçenek olduğunu söylemek mümkündür. Yeşil çatı sistemlerinde belirlenen esasların kentsel ölçekte ele alınarak, kentsel planlama çalışmalarına dahil edilmesi, çevresel yaşam kalitesinin arttırılmasına ve kent ekolojisine belirgin katkılar sağlayacaktır.

## ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

Bu çalışma, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Peyzaj Mimarlığı Programında Prof. Dr. Adnan UZUN danışmanlığında, Ekşi (2012) tarafından hazırlanmış Doktora Tez çalışmasının özetidir.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 5181 ve 10207 numaralı projeleri ile desteklenmiştir.

Çalışmada yeşil çatı sistemi üzerinde kullanılan bitkiler Yeşil Vadi Fidanlığı tarafından, çatı sistemlerinin kurulumu ise Onduline Avrasya A.Ş. tarafından sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

Alexandri, E., Jones, P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs diverse climates. *Building and Environment* 43: 480-493.

Anonim, 2005. *Binyilin Ekosistem Değerlendirme Kurulu Bildirisi*. Birleşmiş Milletler.

Anonim, 2011a. *Crassulacae Acid Metabolism in Cactus and Succulents*. Cactus & Succulent Society Of New Zealand, <http://www.cssnz.org/CAM-in-succulents.php> [Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2011].

Anonim, 2011b. Google Earth.

Bass, B., Baskaran, B., 2003. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. *CCAF Impacts and Adaptation Progress Report*, Institute for Research in Construction National Research Council, NRCC-46737.

Berghage, R.D., Beattie, D., Jarrett, A.R., Thuring, C., Razaei, F., O'Connor, T.P., 2009. *Green Roofs for Stormwater Runoff Control*, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati. EPA/600, 9-26.

Berndtsson, J.C., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36: 351-360.

Carter, T.L., Rasmussen T.C., 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 42(5): 1261-1274.

Chen, X.L., Zhao, H.M., Li P.X., Yin Z.Y., 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use / cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104: 133 - 146.

Connelly, M., Liu, K., 2005. New directions in green roof research green roof research in British Columbia- an overview. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington.

Cushman, J.C., Borland, A.M., 2002. Induction of Crassulacean acid metabolism by water limitation. *Plant, Cell and Environment* 25: 295-310.

Dunnett, N., Kingsbury, N., 2004, *Planting Green Roofs and Living Walls*, Timber Press. Oregon ISBN: 9780881929119.

Dunnett, N., Nagase, A., Booth, R., Grime, P., 2008, Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* 11: 385-398.

Ekşi, M., 2012. İstanbul'daki başlıca çatı bahçelerinin yapım esasları açısından değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University* 62(1): 149-157.

- Ezber, Y., Sen, Ö.L., Kindap, T., Karaca, M., 2007. Climatic effects of urbanization in İstanbul: a statistical and modeling analysis. *International Journal of Climatology* 667-679.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., Principi, P., 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment* 45(8): 1890-1904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>.
- Getter, K.L., Rowe, B.D., 2008. Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosystems* 11: 361–372.
- Gregoire, B.G., Clausen J.C., 2011, Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>.
- Hasdemir, M., 1993. Çatı bahçesi tasarımında göz önünde tutulacak ilkeler. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 40(B3): 85-96.
- Hiltner, R.N., Lawrence, T.M., Tollner, E.W., 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Soil Conservation* 288- 293.
- Kirschstein, C., 1997. Die du Sedum-arten, abgeleitet aus der bedeutung der wurzelsaugspannung-teil 1. *Stadt und Grün* 46: 252–256.
- Kluge, M., 1977. Is *Sedum acre* L. a CAM plant? *Oecologia* 29: 77–83.
- Köhler, M., 2005. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. *Urban Habitats* 4:1, İSSN: 1541-7115.
- Lassalle, F., 1998. Wirkung von trockenstreb auf xerophile pflanzen. *Stadt und Grün* 47(6): 437–443
- Liu, K., Baskaran, B., 2003. Evaluation thermal performance of green roofs, *National Research Council, Institute for Research in Construction* 1-10, NRCC-46412, Kanada.
- Luttge, U., 2004. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Annals of Botany* 93: 629–652.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landscape and Urban Planning* 77: 217-226.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., Mihalakakou, G., 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33(7): 719-729.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.Y., Rowe, D.B., 2007, Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience* 57(10): 823-834.
- Ong, B. L., 2003, Green plot ratio : an ecological measure for architecture and urban planning, *Landscape and Urban Planning* 63: 197-211.
- Ranson, S.L., Thomas, M., 1960. Crassulacean acid metabolism, *Annual. Review of Plant Physiology* 11: 81-110.
- Scholz-Barth, K., 2001. Green Roofs : Stormwater Management From the Top Down. *Official Magazine for the LEED Professional*, 1-9. January/February, edcmag.com.
- Snodgrass E.C, Snodgrass L.L., 2006. *Green roof plants: a resource and planting guide*. Timber Press, Oregon, ISBN-13: 978-0-88192-787-0.
- Spala, A., Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., Mihalakakou, G., 2008. On the green roof system, selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in a office building in Athens, Greece. *Renewable Energy* 33: 173-177.
- Susca, T., Gaffin S.R., Osso, G.R., 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs, *Environmental Pollution* 1-8.

Takebayashi, H., Moriyama, M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42: 2971–2979.

Tan P.Y., Sia, A., 2009. Understanding the performance of plants on non-irrigated green roofs in singapore using a biomass yield approach. *Nature in Singapore* 2: 149–153.

Teemusk, A., Mander, Ü., 2009. Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment* 44: 643-650.

Teeri, J., Turner, M., Gurevitch, J., 1986. The response of leaf water potential and crassulacean acid metabolism to prolonged drought in *Sedum rubrotinctum*. *Plant Physiology* 81: 678-680.

Tunbiş, M., 1987. Çatı bahçeleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 37(B4): 103-116.

Vanwoert, N. D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., Xiao, L., 2005. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality* 34(3): 1036-1044.

Villarreal, E.L., Bengtsson, L., 2005. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25: 1-7.

Wolf, D., Lundholm, J.T., 2008. Water uptake in green roof microcosms : Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering* 33:179–186.

Wolf, J., 1960. Der diurnale saurerhythmus. *Encyclopedia of Plant Physiology*, Springer-Verlag, 12:809-89, Berlin.

Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A., 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38: 261–270.