



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN SU VE ENERJİ DENGESİ
AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ**

Mert EKŞİ

Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı

Peyzaj Mimarlığı Programı

Danışman

Prof.Dr. Adnan UZUN

Mayıs, 2012

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN SU VE ENERJİ DENGESİ
AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ**

Mert EKŞİ

Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı

Peyzaj Mimarlığı Programı

Danışman

Prof.Dr. Adnan UZUN

Mayıs, 2012

İSTANBUL

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin 10207 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof.Dr. Adnan UZUN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Araştırmam sırasında, araştırma sahasının oluşturulmasında destekleri için, başta Yük. Mim. Atilla GÜRSES olmak üzere Onduline Avrasya A.Ş.'ye, Ümit KİREMİTÇİ ve Erkan DALKIRAN başta olmak üzere Kiremitçiler İnşaat ailesine ve Yeşil Vadi Fidanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamda bilgi ve görüşlerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof.Dr. Ömer Lütfi ŞEN'e ve Prof. Dr. Ömer KARAÖZ'e teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, araştırmamın tüm aşamalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen Araş.Gör. G. Aslı AKSU'ya, Araş.Gör. Hüseyin YURTSEVEN'e, Araş.Gör. Simay KIRCA'ya, Salih ERTÜRK'e ve Yrd.Doç.Dr. Barış TECİMEN'e teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen Peyzaj Mimarlığı Bölümü ve Orman Fakültesi'ndeki tüm çalışma arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim. Çalışmamın uygulama kısmını destekleyen İstanbul Üniversitesi'ne teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her alanında bana destek olan eşim Pınar ŞENKAYNAK EKŞİ'ye teşekkür ederim. Maddi ve manevi olarak benden destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme minnetlerimi sunarım.

Mayıs, 2012

Mert EKŞİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. YEŞİL ÇATI KAVRAMI VE DÜNYADAKİ GÜNCEL DURUMU	4
2.2. YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN FİZİKSEL ÇEVREDEKİ DENGELEYİCİ ÖZELLİKLERİ	8
2.3. YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN EKOLOJİK DÖNGÜSÜ	11
3. MALZEME VE YÖNTEM	13
3.1 ARAŞTIRMA ALANININ TANITIMI	13
3.2 ARAŞTIRMA İSTASYONUNUN TESİSİ	14
3.3 VERİ TOPLAMA VE DEĞERLENDİRME.....	24
4. BULGULAR	31
4.1. İKLİMSEL VERİLER	32
4.2. ARAŞTIRMA ALANINDAN ELDE EDİLEN FİZİKSEL VERİLER	37
4.2.1. Çatı Sistemlerinde Oluşan Isı, Sıcaklık ve Çevresel Etkiler	37
4.2.2. Çatı Sistemlerinin Yansıtıcılık (Albedo)Değerleri	56

4.2.3. Yetiştirme Ortamından Elde Edilen Sıcaklık ve Nem Değerleri.....	58
4.3. ARAŞTIRMA ALANINDA YÜZEYSEL AKIŞ	68
4.3.1. Yüzeysel Akış Değerleri.....	70
4.3.2. Yüzeysel Akışa Geçen Suyun Elektrik İletkenliği ve pH Değerleri.....	82
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	89
6. KAYNAKLAR.....	106
7. EKLER	114
7.1. EK 1 BİTKİSEL DOKU	115
7.2. EK 2 ÖLÇÜM VE DEĞERLENDİRME	120
7.3. EK 3 ÇATI YÜZEYİNDE OLUŞAN DÖNEMSEL DEĞİŞİMLER	125
8. ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	: Araştırma Sahasının Konumu	13
Şekil 3.2	: İÜYÇAP Batı yönünden görünüş	15
Şekil 3.3	: Araştırma alanı planı ve ölçüleri	16
Şekil 3.4	: Yeşil çatı sisteminin katman dizilişi.....	18
Şekil 3.5	: Çatı yüzeyine su yalıtımı uygulaması	19
Şekil 3.6	: Yeşil çatı sisteminin oluşturulması.....	19
Şekil 3.7	: Yeşil çatı katmanları arasında bulunan sıcaklık sensörlerive ısı akısı ölçüm plakaları	19
Şekil 3.8	: İÜYÇAP genel sistem detayı	20
Şekil 3.9	: İÜYÇAP yeşil çatı katmanları arasında bulunan ölçüm cihazları.....	21
Şekil 3.10	: Araştırma istasyonu – dış görünüm.....	22
Şekil 3.11	: Çatının üzerinde bulunan meteorolojik ölçüm cihazları	22
Şekil 3.12	: Bitki türleri	23
Şekil 3.13	: Ölçüm döneminde yeşil çatı üzerindeki bitkilerin gelişimi.....	23
Şekil 3.14	: Deneme sahasında bulunan su hazneleri ve ölçüm sistemi.....	25
Şekil 3.15	: İÜYÇAP veri kayıt sistemi ve sistem bileşenleri.....	26
Şekil 3.16	: Çalışmada kullanılan toprak nem sensörü.....	29
Şekil 3.16	: Çalışmada kullanılan toprak nem sensörü.....	29
Şekil 4.1	: Deneme alanının aylara göre güneşlenme durumu	32
Şekil 4.2	: Rüzgar esme eayıları	33
Şekil 4.3	: Aylık ortalama yağış miktarının 30 yıllık verilerle karşılaştırılması ...	34
Şekil 4.4	:Yıllık ortalama yağış miktarının 30 yıllık verilerle karşılaştırılması	34
Şekil 4.5	: Aylara göre ardışık yağışsız günlerin sayısı.....	35
Şekil 4.6	: Ölçülen aylık sıcaklık ortalamaları ile 30 yıllık verilerin karşılaştırılması	36
Şekil 4.7	: Ölçülen yıllık sıcaklık ortalaması ile 30 yıllık verilerin karşılaştırılması	36
Şekil 4.8	: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıkları (Günlük ortalama değerler)	38
Şekil 4.9	: Çatı Sistemlerinin yüzey sıcaklıkları (aylık ortalama değerler).....	39
Şekil 4.10	: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıklarının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri	40
Şekil 4.11	: Aylara göre çatı sistemlerinin yüzey sıcaklıklarında oluşan sıcaklık değişimleri	41
Şekil 4.12	: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıklarının mevsimlere göre dağılımı	42
Şekil 4.13	: Her iki çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasının günlük ortalama sıcaklık değerleri	42
Şekil 4.14	: Her iki çatı sisteminin altındaki çatı yüzeylerinin aylık ortalama sıcaklık değerleri	43

Şekil 4.15	: Her iki çatı sisteminin altındaki çatı levhası sıcaklıklarının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri	43
Şekil 4.16	: Aylara göre çatı sistemlerinin altındaki çatı levhalarında oluşan sıcaklık dalgalanmaları.....	45
Şekil 4.17	: İç mekan sıcaklıklarının günlük ortalama değerleri	46
Şekil 4.18	: İç mekan sıcaklıklarının aylık ortalama değerleri	46
Şekil 4.19	: En sıcak gün içerisinde çatı katmanlarının sıcaklık dağılımları.....	47
Şekil 4.20	: En soğuk gün içerisinde çatı katmanlarının sıcaklık dağılımları	48
Şekil 4.21	: 13 Nisan 2011’de gün içerisindeki güneş ışıını ve ısı akısı değerleri.....	49
Şekil 4.22	: 13 Nisan 2011’de gün içerisindeki sıcaklık değerleri	49
Şekil 4.23	: 14 Mayıs 2011’de gün içerisindeki yansıma değerleri.....	51
Şekil 4.24	: 14 Mayıs 2011’de gün içerisindeki sıcaklık değerleri.....	51
Şekil 4.25	: Ölçüm dönemi içerisinde rastgele seçilen günlerde oluşan çatı yüzey sıcaklıkları	52
Şekil 4.26	: Ölçüm dönemi içerisinde rastgele seçilen günlerde oluşan çatı levhası sıcaklıkları.....	53
Şekil 4.27	: Her iki çatı sisteminde oluşan günlük ortalama ısı akısı miktarı	54
Şekil 4.28	: Her iki çatı sisteminde oluşan aylık ortalama ısı akısı miktarı.....	55
Şekil 4.29	: Çatı yüzeylerinin günlük ortalama yansıtıcılık değerleri	56
Şekil 4.30	: Çatı yüzeylerinden yansıyan günlük ortalama enerji miktarı.....	56
Şekil 4.31	: Çatı yüzeylerine gelen güneş ışıını ile yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması	57
Şekil 4.32	: Günlük ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerleri	58
Şekil 4.33	: Aylık ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.34	: Yeşil çatı yetiştirme ortamı sıcaklığının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri	60
Şekil 4.35	: Aylık ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerlerinin mevsimlere göre değişimi.....	61
Şekil 4.36	: Aylık toplam yağış – ortalama yetiştirme ortamı nemini	61
Şekil 4.37	: Mevsimlere göre toplam yağış – ortalama yetiştirme ortamı nemini	62
Şekil 4.38	: Aylık ortalama yetiştirme ortamı nem değerleri – çevresel etmenler.....	62
Şekil 4.39	: Yetiştirme ortamında en uzun ardışık yağışsız günlerde oluşan nem değerleri.....	64
Şekil 4.40	: Günlük ortalama yetiştirme ortamı sıcaklık değerleri	66
Şekil 4.41	: Aylık ortalama yetiştirme ortamı sıcaklık değerleri	67
Şekil 4.42	: Yağış sırasında her iki çatı sisteminde yüzeysel akış oluşumu.....	68
Şekil 4.43	: 6 Ocak 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	70
Şekil 4.44	: 16 Ocak 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	70
Şekil 4.45	: 19 Şubat 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	71
Şekil 4.46	: 10 Mart 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	71
Şekil 4.47	: 9 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	72

Şekil 4.48	: 14 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	72
Şekil 4.49	: 18 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	73
Şekil 4.50	: 4 Mayıs 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	73
Şekil 4.51	: 4 Mayıs 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	74
Şekil 4.52	: 13 Haziran 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	75
Şekil 4.53	: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	75
Şekil 4.54	: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi.....	76
Şekil 4.55	: 11 Ağustos 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	77
Şekil 4.56	: 11 Ağustos 2011 tarihinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi.....	77
Şekil 4.57	: 21-22 Eylül 2011 tarihlerinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi.....	78
Şekil 4.58	: 30 Eylül 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	79
Şekil 4.59	: 30 Eylül 2011 tarihinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi	79
Şekil 4.60	: 9 Ekim 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	80
Şekil 4.61	: 17 Kasım 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	80
Şekil 4.62	: 7 Aralık 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması	81
Şekil 4.63	: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun günlük ortalama elektrik iletkenliği değerleri	82
Şekil 4.64	: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun aylık ortalama elektrik iletkenliği değerleri	83
Şekil 4.65	: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun günlük ortalama pH değerleri	83
Şekil 4.66	: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun aylık ortalama pH değerleri.....	84
Şekil 4.67	: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde çatı sistemlerinden tahliye edilen suyun pH değerlerindeki değişim	84
Şekil 4.68	: 30 Eylül 2011 tarihlerinde çatı sistemlerinden tahliye edilen suyun pH değerlerindeki değişim	85
Şekil 4.69	: Çalışma dönemi boyunca bitkilerin çatıyı kaplama oranı	86
Şekil 4.70	: Çatı yüzeyinden elde edilen fotoğraf örneği	87
Şekil 5.1	: Çatı katmanlarından elde edilen aylık sıcaklık değerleri	95

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Dünyada yeşil çatı sistemleri ile ilgili bilimsel çalışmalar yürüten başlıca kuruluşlar	7
Tablo 3.1	: Deneme sahası ile ilgili bilgiler.....	16
Tablo 3.2	: Sistemden elde edilen veri tipleri ve ölçüm aralıkları.....	27
Tablo 4.1	: Elde edilen verilerle ilgili istatistikler.....	31
Tablo 4.2	: Çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri	37
Tablo 4.3	: Çatı sistemlerinin yüzey ve çatı levhası sıcaklıklarının belirlenen sıcaklık aralıklarına göre dağılımı.....	55
Tablo 4.4	: Aylara göre toplam yağış, ortalama yetiştirme ortamı nemi, ardışık yağışsız günler.....	66
Tablo 5.1	: Çatı sistemlerinin yapısal katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (R).....	91

SEMBOL LİSTESİ

CAM	: <i>Crassulaceae</i> Asit Metabolizması
cbar	: Santibar
HSC	: Çatının bulunduğu konumdaki hava sıcaklığı
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İÜYÇAP	: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü Peyzaj Teknikleri A.B.D. Yeşil Çatı Araştırma İstasyonu
°C	: Santigrad derece
pH	: asitlik / bazlık derecesi
RÇ1	: Referans çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı/Referans
RÇPYR	: Referans çatıda oluşan yansıma miktarı
RÇYZY	: Referans çatının yüzey sıcaklığı
RÇ	: Referans çatı
YÇ DRN	: Yeşil çatının altında bulunan drenaj levhasının sıcaklığı
YÇF	: Yeşil çatının altında bulunan filtre örtüsünün sıcaklığı
YÇKU	: Yeşil çatının altında bulunan su tutucu keçenin sıcaklığı
YÇ PYR	: Yeşil çatıda oluşan yansıma miktarı
YÇ SU YAL	: Yeşil çatının altında bulunan su yalıtımının üzerindeki sıcaklık
YÇ YET	: Yeşil çatının yetiştirme ortamı sıcaklığı
YÇ YZY	: Yeşil çatının yüzey sıcaklığı
YÇ1	: Yeşil çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı/Yeşil çatının en alt noktasının sıcaklığı
YÇ	: Yeşil çatı

ÖZET

YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN SU VE ENERJİ DENGESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

“Yeşil Çatı” kavramı ilk olarak 1800’lü yıllarda İskandinavya’daki yapılarda ısı yalıtımı yapılması amacıyla ortaya çıkmıştır. Binaların üzerinde tesis edilen yeşil çatıları İskandinavya’daki insanlar yoğun olarak kullanmış ve bu yaklaşım Kuzey Avrupa’da da yayılmıştır.

Modern yeşil çatı sistemleri günümüzden yaklaşık 60 yıl kadar önce yapılar üzerinde kullanılmaya başlanmıştır. Kentlerde her geçen gün oluşan yoğun kullanımlar ve kaybolan yeşil alanlar sonucu, yeşil çatıların önemi artmaktadır. Yeşil çatılar, genellikle küçük boylu bitkiler ya da yer örtücülerden, sığ yetiştirme ortamlarından, geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilmiş hafif yapı malzemelerinden oluşmaktadır. Bu sayede, yeşil çatılar fazla bakım gerektirmeyen, kurulumu kolay olan ve üzerinde bulunduğu binaya fazla ağırlık getirmeyen yapılardır. Yeşil çatılar, özellikle binalarda ısı yalıtımı, soğutma ve ısıtma giderlerinin düşürülmesi, enerji tasarrufu, şehirlerde aşırı sıcaklık etkilerinin azaltılması, yüzeysel akış kontrolü, suyun yeniden kullanılması ve şehrin kanalizasyon sistemindeki yükün azaltılması amacıyla kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmanın amacı, farklı iklim şartlarına sahip olan ülkemizde, örnek bir yeşil çatı kurularak, yapılan ölçümler yardımıyla, özellikle Marmara Bölgesi’ne hitap edecek koşullarda, yeşil çatıların ısı yalıtımı, su tutma kabiliyetleri, bitkilerin büyüme durumu, rüzgar etkileri, üzerinde bulundukları bina ile olan ilişkileri, yaban hayatına olan etkileri ve dolayısıyla bu sayede şehre getirecekleri katkıların belirlenmesi açısından bu çalışma önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında öncelikle yeşil çatı sistemlerinin dünyadaki güncel durumu ve bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Yapılan ön denemeler yardımıyla bitki türlerinin seçimi gerçekleştirilmiş ve *Sedum* türlerinin yeşil çatı sistemlerine uygunluğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, detaylı araştırmaların yapılabilmesi için bir araştırma alanı tesis edilmiştir. Araştırma alanında, çeşitli ölçüm ekipmanları ile yeşil çatı sistemlerinin İstanbul şartlarında su ve enerji dengesi açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Bu sayede İstanbul şartlarındaki bir yeşil çatının sürekliliği, kente ve üzerinde bulunduğu yapıya getirdiği faydalar tespit edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, ortaya çıkan veriler temel alınarak İstanbul ölçeğinde değerlendirilmiştir.

Çalışma sırasında yapılan ölçümler yeşil çatı sisteminin yüzeyinde oluşan sıcaklık değişiminin referans çatıya göre daha hızlı olduğunu ancak yüzeyde oluşan bu değişimin yeşil çatı sistemi tarafından %79 oranında azaltılabildiğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda yeşil çatı sistemi çatı yüzeyine gelen yağışın yüzeysel akışa dönüşmesini 23 saate kadar geciktirebilmekte ve %12,8 - %100 oranında engelleyebilmektedir.

SUMMARY

EVALUATION OF THE GREEN ROOF SYSTEMS IN TERMS OF WATER AND ENERGY BALANCE: A CASE STUDY IN ISTANBUL

Green Roof concept initially arrived aiming to be used for the heat insulation of the houses in Scandinavia in 1800's. People, who had lived in Scandinavia, used the green roofs on their houses for this purpose and this approach had spread in North Europe.

Modern green roofs have been used for nearly 60 years on modern buildings. As a result of intensive usage and lost green areas in the cities, the importance of green roofs has increased. Green roofs usually consist of small plants or ground covering plants, shallow growing medium, light-weight materials which are produced from recycled materials. Therefore, green roofs have low maintenance needs, easy installation opportunities and also they don't bring too much weight to the building below. Green roofs are used for heat insulation on the buildings, reducing the energy costs of cooling and heating, stormwater run-off control, reducing the urban heat island effect and waste water management.

Aim of this study is to investigate the constructional properties of a typical extensive green roof and its relation with the environment in climate conditions of Istanbul through comparative field measurements in research station. Thus, performance of green roofs will be measured with this study. For our country which has different climate conditions, especially in Marmara Region, this study has an importance to determine some of the properties of the green roofs like heat insulation, water retention abilities, growing speed of the plants, wind effects, relations with the building, effects to biodiversity and by this way benefits that they bring to the city.

In this study, actual status of the green roofs and academic studies related with this subject was investigated. With the initial experiments, plant species were detected and suitability of *Sedum* species for the green roofs were determined. A research station was established to perform detailed analysis. With this study, evaluation of a green roof system was performed in terms of water and energy balance. Sustainability of a green roof in Istanbul climate and its benefits to the building were determined.

Measurements during study period show that, temperature fluctuations on the green roof surface were higher than reference roof due to rapid warming-cooling cycle of the roof surface. However, impacts of extreme temperature fluctuations on the surface of the green roof to the building envelope were reduced by the green roof system by 79%. Green roof system delayed the runoff between 1 to 23 hours in several rain events. In addition, green roof prevented the runoff between 12,8% and 100%.

1. GİRİŞ

Estetik amaçlarla oluşturulan çatı bahçelerinin tarihi, M.Ö. 2000 yılına kadar uzanmaktadır. Geçmiş yıllarda çatı bahçeleri estetik birer objeyken, günümüzde çevresel yararları için de tesis edilen alanlardır. Yeşil çatılar olarak adlandırılan ekolojik amaçlı çatı bahçelerinin ilk kullanıldığı bölge bilindiği üzere Kuzey Avrupa'dır. Kuzey Avrupalı kâşifler, 19. yüzyılın başlarında uzun ve soğuk kış aylarında oluşan sert koşullarda yaşayabilmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan biri de, çatının toprakla kaplanarak üzerinin otlar ve diğer bazı bitkilerle stabilize edilmesi ve bu sayede ısı yalıtımı sağlanması amacıyla oluşturulan çayır örtüsü ile kaplı çatılardır (Osmundson, T., 1999). 1960'lı yılların başlarında İsviçre'de geliştirilen modern yeşil çatı teknolojileri, özellikle Almanya ile birlikte birçok ülkede yaygınlaşmıştır (Bass, B. ve Baskaran, B., 2003).

Kentlerde her geçen gün oluşan yoğun kullanımlar ve kaybolan yeşil alanlar sonucu, yeşil çatılar daha da önem kazanmaya başlamıştır. 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, N. ve Kingsbury, N., 2004). Yeşil çatı sistemleri “intensif çatı bahçelerine” göre daha az bakım gerektirmekte ve daha sığ yetiştirme ortamlarına ihtiyaç duymaktadırlar (Dunnett, N. ve Kingsbury, N., 2004; Obendorfer, E., ve diğ., 2007).

Son yıllarda kentlerde yapılaşmadaki hızlı artış ve küresel ısınma ile ilgili kaygılar nedeniyle dünyada yeşil çatılar ile ilgili deney sahaları ve akademik çalışmalarda artış gözlenmektedir. Kuzey ülkelerinde uzun yıllardır yaygın bir biçimde kullanılan yeşil çatılar, yapılaşmayla kaybedilmiş toprak ya da bitkilerle kaplı alanların binaların üzerinde bir nebze de olsa yaşatılması düşüncesiyle gelişim göstermiştir. Bu anlayış, ekolojik yapılar ya da ekolojik mimari kavramlarıyla örtüşmektedir.

1980’li yıllarda Almanya’nın Darmstadt kentinde ortaya çıkan “Passivhaus” kavramı, yapılarda enerji verimliliğini esas alan bir tasarım anlayışıdır (Anonim, 2011a). Pasif evlerde enerji ihtiyacı yenilenebilir kaynaklardan sağlanmakta, atık sular arıtılmakta, inşaatında mümkün olduğunca geri dönüştürülmüş/dönüştürülebilir malzemeler kullanılmakta ve suyun mümkün olduğunca verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Küresel ısınma kavramı ile birlikte ortaya çıkan çevreci yaklaşımlar, kent peyzajında suyun etkin kullanımı, su ihtiyacı düşük olan bitki türlerinin kullanımı, kentlerdeki ısı adası etkilerinin azaltılması, yansıtıcılık özelliği yüksek, ısınmayan, suyun geçişine imkan veren yerel yüzey kaplamalarının kullanımı gibi konuların önem kazanmasına neden olmuştur.

Son yıllarda dünyada “yeşil bina” kavramlarına duyulan ilgi, bir anlamda yapıların çevreleriyle uyumlu hale getirilmelerini sağlamaya yönelik sertifika ve değerlendirme programlarının da gelişmesine neden olmuştur. Dünyada en yaygın kullanıma sahip olan sertifika programları LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ve BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) olmakla beraber, birçok ülkede çeşitli kurumların çeşitli denetleme ve derecelendirme modelleri geliştirilmektedir.

Genel olarak bakıldığında, çatı bahçeleri estetik amaçlı kullanılırken, yeşil çatılar kent ekosistemine getirdikleri bazı yararlar nedeniyle de kullanılmaktadırlar. Yeşil çatılar, özellikle binalarda ısı yalıtımı, soğutma ve ısıtma giderlerinin düşürülmesi, enerji tasarrufu, şehirlerde aşırı sıcaklık etkilerinin azaltılması, yüzeysel akış kontrolü, suyun yeniden kullanılması ve şehrin kanalizasyon sistemindeki yükün azaltılması amacıyla kullanılmaktadırlar.

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 edilmiştir. Farklı iklim şartlarına sahip olan ülkemizde, özellikle Marmara Bölgesi'ne hitap edecek koşullarda;

- Yeşil çatıların yapıya sağladığı ısı yalıtımı,
- Çatı sistemlerinde oluşan sıcaklık değişimleri,
- Yeşil çatı sisteminin su tutma potansiyeli,
- Yüzeysel akışa olan katkıları,
- Bitkisel dokunun gelişme durumu,
- Çatı sistemlerinin yansıtıcılık (albedo) özellikleri
- Yeşil çatı sistemlerinin sürdürülebilirliği

hakkında çalışmalar yapılmıştır.

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. GENEL KISIMLAR

2.1. YEŞİL ÇATI KAVRAMI VE DÜNYADAKİ GÜNCEL DURUMU

Yeşil çatı kavramı, binaların yaşayan çevreye uyum sağlaması için kullanılan bir kavramdır. Yeşil çatılar, binaların yapısal sistemini çok az değiştirerek ya da hiç değiştirmeden, çok fazla sulama ya da bakım gerektirmeden, şehirdeki çatıları yaşayan bir bitki örtüsüyle kaplamak olarak tanımlanabilir.

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

Günümüzde kullanılan yeşil çatıların ilham kaynağı, 19. yüzyılın başlarında Kuzey Avrupa'da çatının toprakla kaplanarak üzerinin otlar ve diğer bazı bitkilerle stabilize edilmesi ve bu sayede ısı yalıtımı sağlanması amacıyla oluşturulan çatı sistemleridir. 1960'lı yılların başlarında İsviçre'de bu sistemlerden yardım alınarak geliştirilen modern yeşil çatı teknolojileri, özellikle Almanya ile birlikte birçok ülkede yaygınlaşmıştır (Bass, B. ve Baskaran, B., 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, E. ve diğ., 2007). 1980'li yıllardan sonra inşa edilen çatı bahçeleri, bitki örtüsünü kent alanlarına geri getirme fikriyle inşa edilmiştir (Köhler, M., 2005).

Dünyada ve ülkemizde “çatı bahçesi”, “yeşil çatı”, “ekolojik çatı”, “bitkilendirilmiş çatı”, “çim çatı”, “yaşayan çatılar”, “eko çatı”, “sürdürülebilir çatı” gibi çeşitli isimlerle de anılmakta olan bu sistemlerin, aslında tümü benzer kavramları tanımlamakla birlikte, bu sistemlerin kullanım amaçları (estetik-ekolojik), yapısal katmanları ve bitkilendirme özellikleri ayırım noktalarını oluşturmaktadır.

Modern çatı bahçeleri bitkilendirme tipine ve planlanan alanın kullanımına bağlı olarak intensif (yoğun) ve ekstensif (seyrek) sistemler olarak sınıflandırılabilirler (Getter, K.L. ve Rowe, D.B., 2006; Ekşi, M. ve Uzun, A., 2012). Bu iki sistemin karışımıyla elde edilen çatı bahçeleri ise yarı-intensif çatı bahçeleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu ayrımı oluşturan en önemli etken bitkilendirme tipidir. Bitkilendirme tipinin değişmesi, yeşil çatı sistemini oluşturan yapısal katmanlarda da değişikliklere yol açmaktadır (Ekşi, M., 2012).

“İntensif (yoğun) sistemler” derin yetiştirme ortamlarına sahip, büyük çalılar ve ağaçlar kullanılarak, yer seviyesindeki bir bahçeye benzer biçimde oluşturulan çatı bahçeleri olarak tanımlanabilirler. “Ekstensif (seyrek) sistemler” genellikle *Sedum* türleri gibi rejenerasyon yetenekleri yüksek ve kuraklığa dayanıklı yer örtücü bitkilerle bitkilendirilmiş, intensif sistemlere göre daha sık yetiştirme ortamlarına sahip olan (2-15 cm), yapıya fazladan ağırlık getirmeyen, gelişmiş drenaj ya da sulama sistemleri içermeyen, genellikle üzerinde bulunduğu yapıya ve çevresine sağladığı ekolojik katkıları nedeniyle tesis edilen çatı bahçeleridir.

Yeşil çatı kavramı, binaların yaşayan çevreye uyum sağlaması için kullanılan bir kavramdır. Ekstensif sistemler, intensif çatı bahçelerine göre daha az bakım gerektirmekte, daha sık yetiştirme ortamlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Bu sistemler aynı zamanda daha kullanışlıdır (Obendorfer E. ve diğ., 2007; Uzun, A., 2002). Ekstensif sistemler herhangi bir sulama sistemine ihtiyaç duymadan alt katmanlarında biriktirdiği suyu kullanabilmektedirler.

Ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan yeşil çatı sistemi, %1 eğimli teras çatılara uygulanan, sık yetiştirme ortamına sahip, kuraklığa ve çatıdaki değişken iklim şartlarına

uyum sağlayabilen türlerle bitkilendirilmiş sistemlerdir. Dünyada, yeşil çatılarda en çok tercih edilen bitkiler *Crassulaceae* familyasına ait *Sedum* cinsi bitkilerdir.

Günümüzde yeşil çatılar, kentlerde estetik özelliklerinin yanı sıra kent ekosistemine getirdikleri birçok yararları nedeniyle kullanılmaktadırlar. Yapılan bilimsel çalışmalar, yeşil çatıların bina ve kent ölçeğinde pek çok yararının olduğunu ortaya koymaktadır. Yeşil çatıların ekolojik, teknik ve sosyal yararları dünyanın birçok yerinde kabul görmektedir (Ngan G., 2004). Bunlar;

- Yüzeysel akış kontrolü ve azaltılması,
- Suyun yeniden kullanımı,
- Sera etkisini azalma,
- Kentsel biyoçeşitliliğe katkı sağlama,
- Yapıyı dış etkilerden koruma,
- Yapılarda enerji giderlerinin azaltılması / ısı yalıtımı,
- Ses yalıtımı,
- Elektromanyetik yalıtım,
- Havadaki partiküllerin filtre edilmesi,
- Kent içerisinde mikroklima yaratma,
- Suyun filtrasyonu,
- Estetik/görsel etkiler,
- Yaban hayatına barınak sağlama olarak sıralanabilir.

Konuyla ilgili akademik çalışmalar, bu sistemlere öncülük etmekte olan Almanya'da başlamıştır. Son yıllarda dünyadaki bilimsel çalışmalar ile yeşil çatıların bina ve kent düzeyindeki etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır (Kumar, A.R. ve diğ.,2005; Santamouris, M. ve diğ., 2007; Fioretti, R. ve diğ., 2010; Susca, T. ve diğ., 2011; Liu, K., 2004; Lazzarin, R.M. ve diğ., 2005; Wong, N.H. ve diğ., 2003a, Connelly M. ve Liu K., 2005; Moran ve diğ., 2003).

Yapılan bilimsel araştırmalar ve sivil toplum faaliyetleri dikkate alındığında, dünyada yeşil çatıların bir kent politikası olarak uygulanması yaklaşımı gittikçe önem kazanmaktadır. Almanya'daki bu yaklaşım, diğer ülkelerde de kabul görmeye

başlamıştır (Ngan,G., 2004). Kanada’da 2000’li yılların ortalarında yeşil çatı sektörü büyük bir gelişim göstermeye başlamıştır. Bu gelişim ile birlikte 2009 yılında Toronto kenti Kuzey Amerika’da “kentsel yeşil çatı politikasını” yürürlüğe koyan ilk kent olmuştur. Dünyada konuyla ilgili bilimsel çalışmalar yürüten başlıca kuruluşlar Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Dünyada yeşil çatı sistemleri ile ilgili bilimsel çalışmalar yürüten başlıca kuruluşlar

Kurum Adı	Açıklama	Bulunduğu Ülke	Tipi	Web Sayfası
BCIT (British Columbia Institute of Technology) Green Roof Research Program	British Columbia Teknoloji Enstitüsü Yeşil Çatı Araştırma Programı	Kanada	Araştırma Enstitüsü	http://commons.bcit.ca/greenroof/index.html
USGBC (US Green Building Council)	ABD Yeşil Bina Konseyi	ABD	Kamu Kurumu	http://www.usgbc.org/
Green Roofs for Healthy Cities	Sağlıklı Şehirler için Yeşil Çatılar	ABD	Sivil Toplum Örgütü	http://www.greenroofs.org/
ASLA (Amerikan Society of Landscape Architects)	Amerikan Peyzaj Mimarları Birliği	ABD	Meslek Odası	www.asla.org
York University Sustainable Technologies Evaluation Program Evaluation Of An Extensive Green Roof	York Üniversitesi Sürdürülebilir Teknolojileri Değerlendirme Programı	Kanada	Kamu Kurumu/Üniversite İşbirliği	www.sustainabletechnologies.ca
FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V)	Peyzaj Araştırma, Geliştirme ve Konstrüksiyon Topluluğu	Almanya	Sivil Toplum Örgütü	http://www.fll.de/
IGRA – International Green Roof Association	Uluslararası Yeşil Çatı Birliği Ağı	Uluslararası	Sivil Toplum Örgütü	http://www.igra-world.com
SGRA The Scandinavian Green Roof Association	İskandinav Yeşil Çatı Birliği	İsveç	Sivil Toplum Örgütü	www.greenroofs.se
US E.P.A.- United States Environmental Protection Agency	Amerikan Çevre Koruma Ajansı	ABD	Kamu Kurumu	www.epa.gov
The Green Roof Research Program at Michigan State University	Michigan Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırma Programı	ABD	Üniversite	http://www.hrt.msu.edu/greenroof/
North Carolina State University's BAE Green Roof Research	Kuzey Karolayna Eyalet Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırma Programı	ABD	Üniversite	http://www.bae.ncsu.edu/greenroofs/
German Green Roof Association (FBB)	Alman Yeşil Çatı Birliği	Almanya	Sivil Toplum Örgütü	http://www.fbb.de
European Green Roof Association (EFB)	Avrupa Yeşil Çatı Birliği	Uluslararası	Sivil Toplum Örgütü	http://www.efb-greenroof.eu/
University of Applied Sciences Neubrandenburg – The Green Roof Centre of Excellence	Neubrandenburg Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yeşil Çatı Mükemmeliyet Merkezi	Almanya	Üniversite	http://www.gruendach-mv.de/
Southern Illinois University Edwardsville (SIUE) G.R.E.E.N. A Collaborative Green Roof Research Initiative	Güney Illinois Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırma Grubu	ABD	Üniversite	http://www.green-siue.com/
Evaluation of an Extensive Green Roof - York University	York Üniversitesi Ekstansif Yeşil Çatı Araştırması	Kanada	Üniversite	http://www.sustainabletechnologies.ca/
Center for Green Roof Research at Penn State University	Penn State Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırma Merkezi	ABD	Üniversite	http://horticulture.psu.edu/research/labs/green-roof
Colorado State University Green Roof Research	Colorado Eyalet Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırması	ABD	Üniversite	http://greenroof.agsci.colostate.edu/
L'ARRDHOR - CRITT Horticole Association Régionale de Recherche et de Développement Horticole	Fransa Hortikültür Araştırma ve Geliştirme Topluluğu	Fransa	Kamu Kurumu/Üniversite İşbirliği	http://www.critt-horticole.com
Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur der Universität Hannover	Hannover Üniversitesi Bahçe Mimarisi ve Planlama Enstitüsü	Almanya	Üniversite	http://www.ila.uni-hannover.de

2.2 YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN FİZİKSEL ÇEVREDEKİ Dengeleyici Özellikleri

Dünyada şehirlerin toplam nüfusu 20. yüzyılın başında 200 milyon kişiyken (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, X.L. ve diğ., 2006). Kentlerdeki nüfus artışı ve insan faaliyetleri beraberinde kentlerdeki sıcaklık artışını getirmektedir.

“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 nedeni hastalık ve ölümlerin oluşmasına ve su kirliliğinin artmasına neden olabilmektedir. Amerikan Çevre Koruma Ajansı'nın (2011) verilerine göre geçirimsiz çatı yüzeylerine gelen yağış, çatı yüzeylerinden geçerken ısınmakta ve tahliye edilen suların su ekosistemlerine ulaşmasıyla bu alanlardaki sıcaklığın artmasına ve canlı yaşamının olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır.

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, B.L., 2003).

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

Yeşil çatı ekosistemindeki enerji transferi ve taşınması hava şartlarından, bitkilerin fizyolojik işlevlerinden ve yapısal özelliklerden etkilenmektedir. Isı transferini dengeleyen etmenler dış hava sıcaklığı, bağıl nem, güneş ışıınımı (açık – bulutlu gökyüzü), yapısal malzemeler, bitkisel yüzeylerin sert yüzeylere oranı, çatı kaplama malzemesinin özellikleri (rengi vb.), yetiştirme ortamı derinliği, yetiştirme ortamının rengi, su varlığı ve vejetasyon tipi ile bitkilerin çatıyı kaplama oranı olarak ortaya çıkmaktadır (Jim, C.Y. ve Hongming, H., 2010).

Son yıllarda, dünyada küresel ısınmanın azaltılabilmesi amacıyla kentlerdeki geçirimsiz yüzeylerin soğutulması için çalışmalar yürütölmektedir. Bu çalışmalarda önemli bir etken olarak görölen bitkisel dokunun yanı sıra, yansıtıcılığı yüksek malzemeler de kullanılmakta ve bunlar soğuk döşemeler ve soğuk çatılar kavramlarıyla tanımlanmaktadır. Kentlerdeki koyu ve geçirimsiz yüzeylerin ısınmasını önlemek için, bu yüzeylerin albedo (yansıtıcılık) etkisi arttırılmasının yanı sıra yeterli toprak nemi ile birlikte vejetasyon örtüsünü arttırarak evapotranspirasyonun oluşması sağlanabilmektedir (Obendorfer, E. ve diğ., 2007). Bu konuda yeşil çatılar kentlerde önemli bir işleve sahiptir. Bass ve diğ. (2003), yaptıkları simölasyon çalışmasıyla Toronto kentindeki çatı yüzeylerinin %50'sinin yeşil çatılarla kaplanması sonucunda, kent merkezinde 2°C'lik bir sıcaklık düşüşü sağlanacağını tespit etmişlerdir.

Yeşil çatıların, kentsel ölçekte düzenleyici sistemler olarak görev aldıkları konuların arasında yüzeysel akışı azaltma, dengeleme ve su kalitesine olan katkıları yer almaktadır. Kentlerdeki yapılaşmış yüzeylerin oranındaki artış ile oluşan yüzeysel akış arasında doğrudan bir ilişki olduğu ortadadır. Kentsel alanlar doğal alanlara oranla suyun infiltrasyonunu engelleyen daha büyük miktarda geçirimsiz yüzeylere sahip olmaları nedeniyle dikkate değer oranda yüzeysel akış oluşturmaktadır (Vanwoert, N. D. ve diğ., 2005b).

Amerikan Çevre Koruma Ajansı'nın (2003) verilerine göre, geleneksel bir kent dokusu, aynı boyuttaki ağaçlandırma sahasına göre 5 kat daha fazla yüzeysel akış oluşturmaktadır.

Yapılan bilimsel çalışmalar yeşil çatı sistemlerinin yağış sırasındaki yüzeysel akışı geciktirme ya da tamamen engelleme özelliğini ortaya koymaktadır (Vanwoert, N.D., 2005a; Berghage, R. D. ve diğ., 2009; Dunnett, N. ve diğ., 2008).

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, R. ve diğ., 2010). Yeşil çatı sistemlerinin yüzeysel akışı azaltma özellikleri arasındaki farklar yeşil çatı sisteminin özneteliğine ve hava koşullarına bağlıdır (Berndtsson, J.C., 2010). 2-15 cm arasındaki kalınlıklarda değişen yetiştirme ortamlarının çok belirgin su tutma özellikleri tespit edilememiş olsa da, yetiştirme ortamının sahip olduğu özellikler, su tutma kapasitesinde de önemli etkilere sahiptir (Fioretti, R. ve diğ., 2010).

Büyük miktardaki yağışlar sırasında, yeşil çatılar suyu katmanlarında depolamakta ve bu katmanlar suya doyduktan sonra kalan suyu drenaj şebekesine aktarmaktadırlar. Vanwoert ve diğ. (2005b) yapmış olduğu çalışmaya göre, yeşil çatıların çatı üzerine gelen yağışın %80'den fazlasını tutabilme özelliği bulunduğu ortaya konulmuştur. Connely ve diğ. (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, R. ve diğ., 2010).

Yeşil çatıların yüzeysel akışı azalma konusundaki verimlilikleri incelendiğinde, bu sistemlerin $2,54 \text{ mm/m}^2$ 'den az yağışlarda çok verimli olduğu ortaya çıkmaktadır. Daha büyük yağışlarda ise yeşil çatılar geçirimsiz yüzeylerde oluşacak yüzeysel akışı süresini geciktirebilmektedirler (Hilten, R. N. ve diğ., 2008).

Yeşil çatıların yüzeysel akışı düzenleme ile ilgili yararları, kentsel politikalar açısından da önem taşımaktadır. Uzun yıllardır Almanya'nın birçok kentinde mevcut olan yeşil

çatı politikaları sayesinde, yapılarında yeşil çatı bulunduran kent sakinleri belediyelerden finansal destek almakta ya da atık su vergilerinden muaf tutulmaktadır. Aynı zamanda Almanya'nın bazı kentlerinde yeşil çatılar kent ekosisteminde merkezi drenaj sistemleri olarak da görülmektedirler (Ngan,G., 2004).

2.3. YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN EKOLOJİK DÖNGÜSÜ

Dünyada yeşil çatılarda kullanılan bitki türleri ile ilgili akademik çalışmaların başlangıcı, 1970'li yıllarda Kluge'nin yaptığı çalışmalar olarak kabul edilebilir. Dünyada *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, K.L. ve Rowe, B.D., 2008). Teeri ve diğ. (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 yeniden 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 S.L. Ranson ile M. Thomas'ın 1960 yılında kaleme aldığı “Crassulacean Acid Metabolism” adlı makalesinde ortaya konmuştur. Ancak farklı kaynaklarda (Lüttge, U. ve diğ., 2004), J.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 CO₂'in tutulması ve gün içerisinde tekrar CO₂'in özümsemesiyle tanımlanabilir (Cushman, J.C. ve Borland, A.M., 2002). Bu metabolizmaya sahip bitkiler, CO₂'i geceleyin atmosferden alarak, bünyeleri içerisinde bulunan enzimlerin yardımıyla malik asit olarak saklamaktadırlar. Günü 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, 2011b). Bitkiler, atmosferdeki karbondioksiti 3 farklı metabolizma faaliyetiyle sentezleyebilmektedir. Bu faaliyetler, C₃, C₄ ve CAM olarak adlandırılmaktadırlar. C₃ ve C₄'ün aksine CAM, CO₂'nin geceleyin sitozolik fosfoenolpiruvat karboksilaz (cytosolic phosphoenolpyruvate carboxylase - PEPC) yardımıyla alınması ve vakuolde hücre özsuyunun asitleşmesine neden olan malik aside çevrilerek bağlanması olarak tanımlanabilir. Bunu takip eden ilk ışıklı dönemde, malik asit vakuolden malat olarak serbest bırakılarak, hücre özsuyunun deasidite olması sağlanır. Bu durumda CO₂ serbest kalmış olur. Bu asiditasyon-deasiditasyon döngüsü, CAM bitkilerinin fizyolojik yapısının karakteristik özelliğidir (Sayed, O.H., 2001).

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 P.Y. ve Sia, A., 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.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 ARAŞTIRMA ALANININ TANITIMI

Deneme alanı, İstanbul'un kuzey kesiminde, Bahçeköy – Sarıyer bölgesinde, Belgrad Ormanları'nın hemen yakınında, deniz seviyesinden 100 m. yukarıda yer almaktadır. İ.Ü. Orman Fakültesi Kampüsü içerisinde yer alan araştırma istasyonunun konumu Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Araştırma istasyonunun konumu (Anonim, 2011c)

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. Çalışmada belirlenen yeşil çatı sisteminin İstanbul ikliminde sürekliliğinin sağlanması önem taşımaktadır.

İklimsel açıdan 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 diğ., 2007). Araştırma istasyonunun bulunduğu bölge mevsim normallerinde yıllık ortalama 1176 – 1268 mm arasında 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.

3.2 ARAŞTIRMA İSTASYONUNUN TESİSİ

Araştırma kapsamında, yeşil çatı sistemleri ile ilgili ilk denemeler 2006 yılında, küçük ölçekteki örnekler üzerinde bitki türleri ile gerçekleştirilmiş ve çeşitli bulgular elde edilmiştir. Yapılan denemelerde *Alyssum maritimum* (Kuduzotu), *Lamproanthus spectabilis* (Acem halısı) ve *Sedum album* (Dam kuruğu) gibi çeşitli bitki türlerine yer verilmiştir. Bu çalışmalarda *Sedum* türleri, kuraklığa ve sık yetiştirme ortamına gösterdikleri dayanıklılık nedeniyle tercih sebebi olmuşlardır. Yeşil çatı sistemlerinin katman dizilişi ile ilgili yapılan deneme ve literatür araştırmaları sonucunda, çalışmada kullanılabilecek en sık yetiştirme ortamı derinliği ise 50 mm olarak belirlenmiştir.

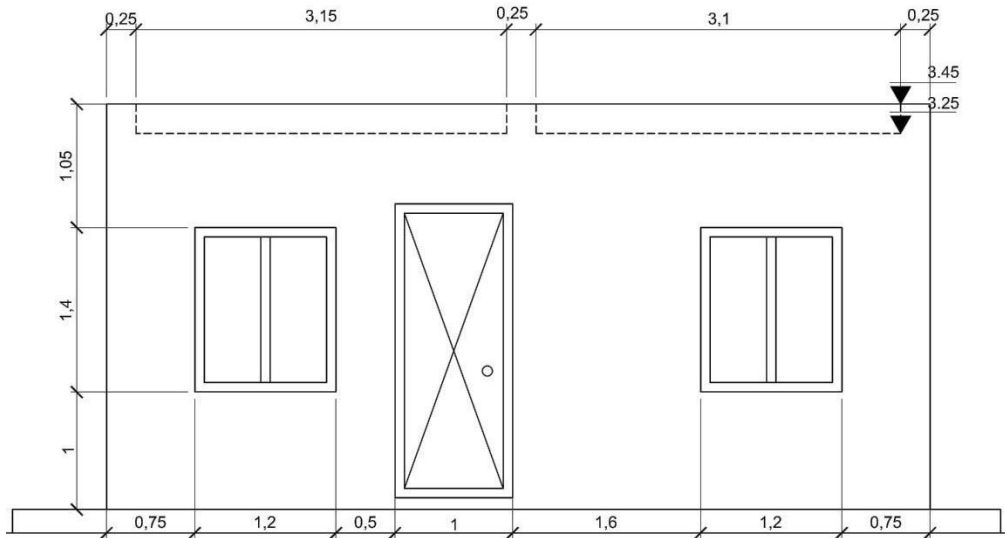
Arazi çalışmaları ve literatür araştırmaları ile başlayan tez çalışması, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce desteklenen araştırma projesi ile daha da güçlü bir kazanım oluşmasını sağlamıştır. Çalışma kapsamında deneysel sonuçlara ulaşabilmek amacıyla Temmuz 2010 tarihinde bir deneme sahası kurulması planlanmış ve bu sayede araştırma alanına ait daha detaylı sonuçlara varılmıştır.

Tez çalışması, 2010 yılında İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü Peyzaj Teknikleri Anabilim Dalı bünyesinde yürütülen ve İ.Ü. Bilimsel Araştırma Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce desteklenen 5181 numaralı "İstanbul İklim Koşullarında Bitkilendirilmiş Çatıların Bina ve Kent Düzeyinde Değerlendirilmesi" adlı bilimsel araştırma projesi ile tesis edilen Yeşil Çatı Araştırma

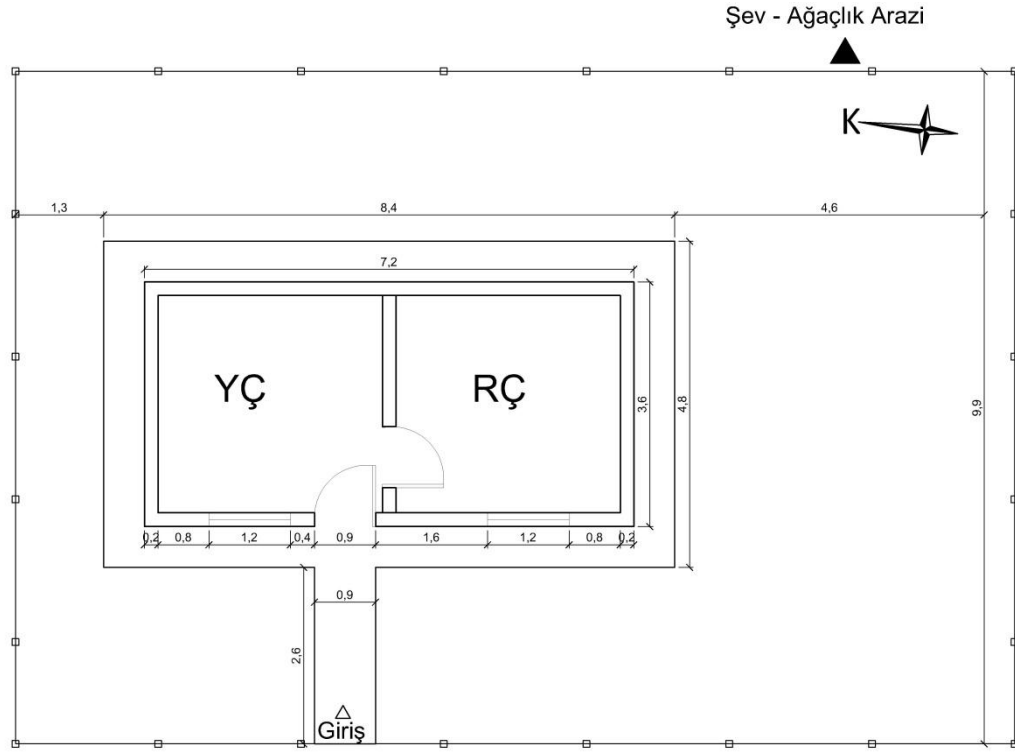
Projesi Gözlem İstasyonu (İÜYÇAP) kapsamında yürütülmüştür. Kurulan deneme sahasında, İ.Ü. Bilimsel Araştırma Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nce desteklenen 10207 numaralı doktora tez projesi kapsamında tez çalışmasına konu olan çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada yapılan ölçümler, 24 m²'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 m² 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.

Araştırma alanı olarak seçilen İ.Ü. Orman Fakültesi yerleşkesinde, arazi tesviyesi ile başlayan prefabrik bina yapımı süreci, bina temelinin 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 (Şekil 3.2 ve 3.3).



Şekil 3.2: İÜYÇAP Batı yönünden görünüş



Şekil 3.3: Araştırma alanı planı ve ölçüleri

Araştırma istasyonu ile ilgili bilgiler ise Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Deneme sahası ile ilgili bilgiler

Açıklama	Ölçüler	Toplam	Birim
Yapı Boyutları (Brüt) U x G x Y	7,20 m x 3,60 m x 3,20 m	25,92	m ²
Yapı Boyutları (Net) U x G	6,8 m x 3,20 m	21,76	m ²
Çatı Boyutları (Net) U x G x Y	6,4 m x 3,20 m x 0,2m	20,48	m ²
Yapının İç Odalarının Boyutları (Net) U x G	3,20m x 3,20m	10,24	m ²
Dış Sınır (Toplam Alan)	10 m x 15 m	150	m ²
Yapının Kapladığı Alan (Yürüme Yolları Dahil)		42	m ²
Güneş Panellerinin Kapladığı Alan U x G	3 m x 3,5 m	10,5	m ²
Açık Alan (Brüt - Yapı Dışındaki Alan)		108	m ²
Açık Alan (Net)		97,5	m ²
Yeşil Çatının Alanı (Net)	3,20 m x 3,20 m	10,24	m ²
Yeşil Çatının Hacmi (Net)	10,24 m ² x 2 m x 0,2 m	4,1	m ³
Çatıya Serilen Yetiştirme ortamı Kalınlığı	50 mm	0,05	m
Çatıya Serilen Yetiştirme ortamının Hacmi	10,24 m ² x 0,05 m	0,5	m ³
Toplam Yeşil / Açık Alan (Yeşil Çatı + Toprak Yüzey)		107,74	m ²
Toplam Sistem Kalınlığı		9,0	cm
Yeşil Çatı Sisteminin Su Depolama Kapasitesi		20 - 30	lt/m ²
Yeşil Çatı Sisteminin Bitkiler Dahil Sistem Ağırlığı		80 - 100	kg/m ²

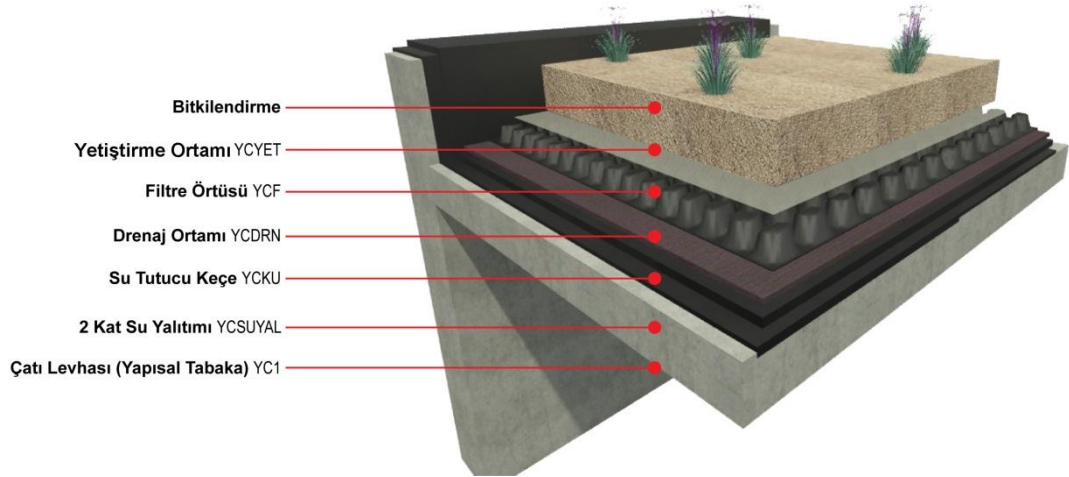
Yapının üzerindeki çatı sisteminin kurulumu destekleyici firma tarafından tamamlanmıştır. Su yalıtımı her iki çatı yüzeyine iki kat uygulandıktan sonra, referans çatı olarak kullanılacak olan teras çatı, yeşil renkli arduvaz minerali kaplı su yalıtım örtüsü ile tamamlanmıştır. Yeşil çatı sistemini oluşturan 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 sisteminde drenaj ya da sulama sistemi yer almamaktadır.

Akademik çalışmalar, kurak iklimlerde tercih edilecek yeşil çatı sistemlerinin, su tutma kapasitesi yüksek, yetiştirme ortamı derin ve kuraklığa toleransı yüksek bitki türlerinden oluşması gerektiğini ortaya koymaktadır. Yetiştirme ortamındaki derinliğin artması, çatı yüzeyine gelen yükü arttıracak gibi, aynı zamanda su tutma ve yalıtım etkilerini de arttırmaktadır. Yurtdışındaki deneme sahaları incelendiğinde, soğuk bir iklime sahip Kanada’da bulunan BCIT (British Columbia Institute of Technology) Yeşil Çatı Programı kapsamında kullanılan yeşil çatı sistemi, 75 – 100 mm’lik bir yetiştirme ortamına sahiptir. Almanya Neubrandenburg Yeşil Çatı Uzmanlık Merkezi’nin araştırma sahalarında 50 – 100 mm yetiştirme ortamına sahip deneme sahaları kullanılmıştır. Daha kurak bir iklime sahip olan ABD Michigan State Üniversitesi Yeşil Çatı Araştırma Programı’nda kullanılan yetiştirme ortamı 25 – 100 mm arasında değişiklik gösteren yetiştirme ortamları kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan yeşil çatı sistemi, yurtdışında bulunan deneme sahaları ve yeşil çatı sistemleri hakkında yapılan araştırmalar sonucu belirlenmiştir. İklimsel özellikler, yeşil çatı sistemlerinin katman dizilişlerinde bazı değişikliklere yol açabilmektedir. Elde edilen bulgular yardımıyla, araştırmaya konu olan yeşil çatı sistemi belirlenmiştir. 5 ana katmandan oluşan yeşil çatı sisteminin toplam kalınlığı 90 – 95 mm’dir. Kullanılan yeşil çatı sisteminde, yetiştirme ortamı olarak dünyadaki benzerlerinde olduğu gibi 50 - 55 mm kalınlığında tuğla ve kiremit kırığı, pomza ve organik maddeden oluşan özel bir bitki yetiştirme ortamı kullanılmıştır. Bu sistemde, yetiştirme ortamından tahliye edilen

fazla su, drenaj levhasına geçerek tutulmakta ve bu suyun fazlası drenaj ortamının altında bulunan su tutucu keçeye geçmektedir. Her iki ortam suya doyduktan sonra, arda kalan su drenaj tabakası tarafından tahliye edilmektedir. Bu sayede, bitkiler yetiştirme ortamındaki suyla birlikte, alt katmanlarda biriken suyu da buharlaşma yoluyla kullanabilmektedirler. Çatı katmanlarının dizilişi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Yeşil çatı sisteminin katman dizilişi

Çatı sisteminin uygulaması ile eşzamanlı olarak çatı katmanları arasına ve üzerine çeşitli sensörler (algılayıcılar) yerleştirilmiştir (Şekil 3.5, 3.6, 3.7). Aynı zamanda ısı geçişini izlemek için gerekli olan ısı akısı ölçüm ve analiz sistemine ait plakalar da katmanlar arasına yerleştirilmiştir. Katmanlar arasındaki sensörlerin dizilişi Şekil 3.8 ve 3.9’de gösterilmiştir.



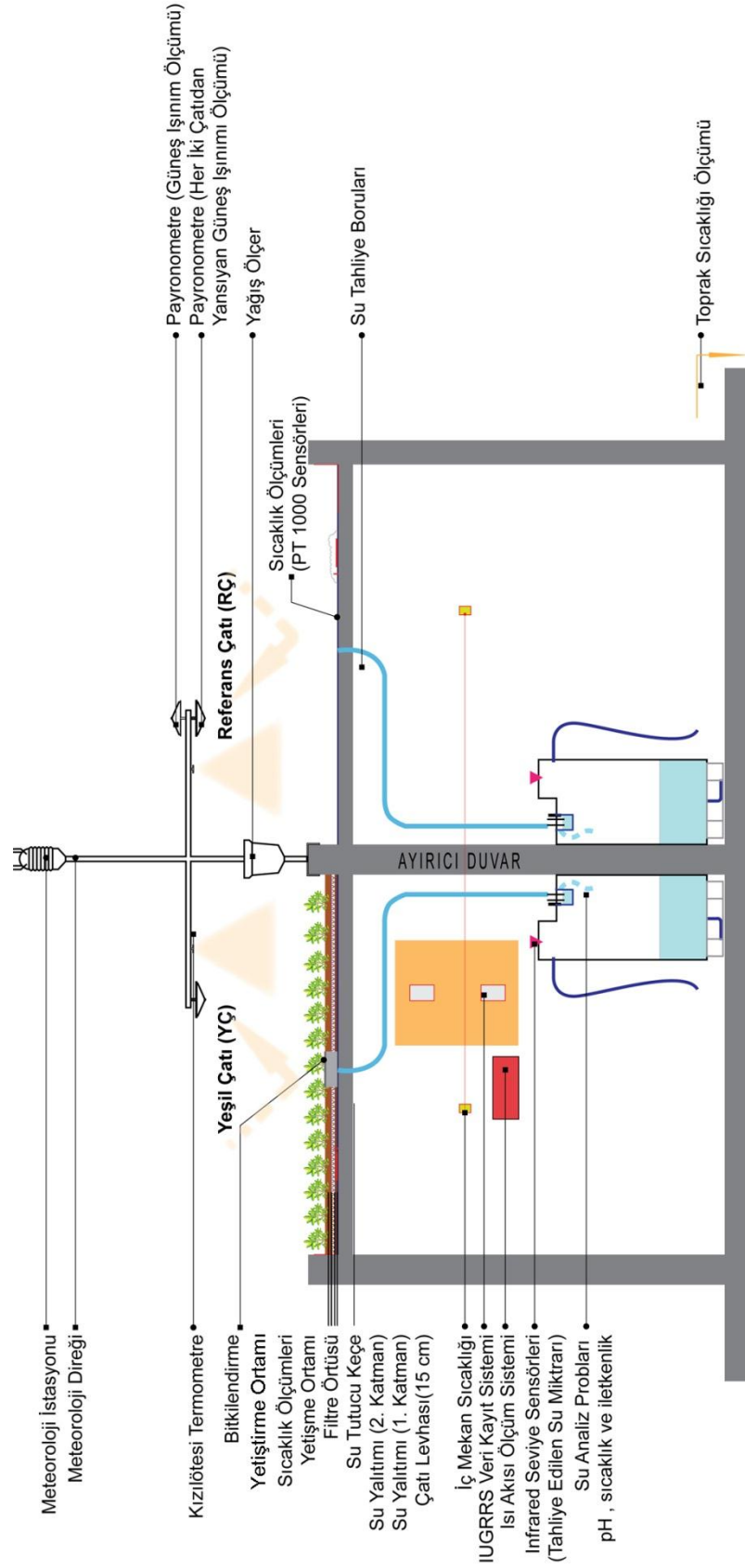
Şekil 3.5: Çatı yüzeyine su yalıtımı uygulaması



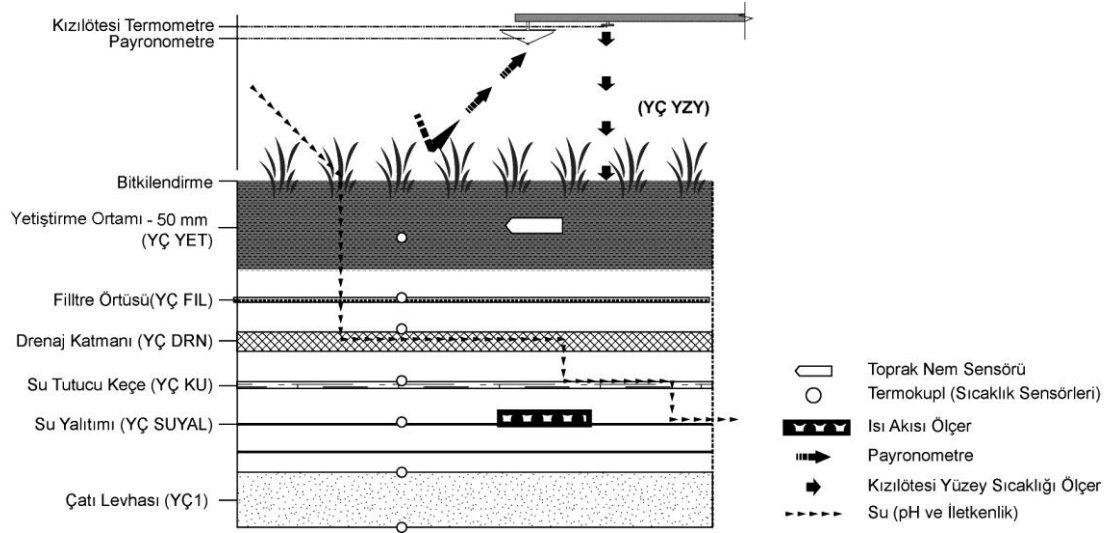
Şekil 3.6: Yeşil çatı sisteminin oluşturulması



Şekil 3.7: Yeşil çatı katmanları arasında bulunan sıcaklık sensörleri(solda) ve ısı akısı ölçüm plakaları(sağda)



Şekil 3.8: İÜYÇAP genel sistem detayı



Şekil 3.9: İÜYÇAP yeşil çatı katmanları arasında bulunan ölçüm cihazları

Çatı sisteminin üzerine, 2 adet kızılötesi sıcaklık ölçer, 3 adet piranometre¹, 1 adet meteoroloji istasyonu içeren paslanmaz çelik meteoroloji direği alana getirilerek monte edilmiştir. Yapı içerisine ise su toplama hazneleri, veri toplama ve kayıt panoları, iç mekan sıcaklık - nem ölçüm aygıtları getirilerek montajları yapılmıştır. Su hazneleri için su giderleri oluşturulmuş, bu haznelerde su kalitesi ölçümlerini gerçekleştirebilmek için gerekli montajlar yapılmıştır.

Araştırma istasyonunda ölçüm işleminin sürekliliğinin sağlanabilmesi için 1,5KW gücünde fotovoltaik güneş panelleri ve güneş enerjisi sistemi kurulmuştur. Deneme alanı ile ilgili görünüm Şekil 3.10 ve 3.11’de gösterilmiştir.

¹ Piranometre (ing. *Pyranometer*) Bir yüzeye gelen güneş ışınımı ya da yüzeyden yansıyan güneş radyasyonunun ölçülmesinde kullanılan bir ölçüm cihazıdır (ANONİM,2006).



Şekil 3.10: Araştırma istasyonu – dış görünüm



Şekil 3.11: Çatının üzerinde bulunan meteorolojik ölçüm cihazları

Dünyadaki ekstensif çatı bahçesi sistemlerinde sıkça kullanılan *Sedum* türleri, bu çalışmada da 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 çeşit *Sedum* türünün kullanılmasına karar verilmiştir. Yeşil çatı sisteminin bitkilendirilmesinde *Sedum reflexum*, *Sedum spurium* "Album" ve *Sedum spurium* "Atropurpureum" türleri kullanılmıştır(Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Bitki türleri

Çatı üzerine dikilen bitkilerin zaman içerisindeki gelişimi Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Ölçüm döneminde yeşil çatı üzerindeki bitkilerin gelişimi (18 Eylül 2010 Solda, 18 Ekim 2011 Sağda)

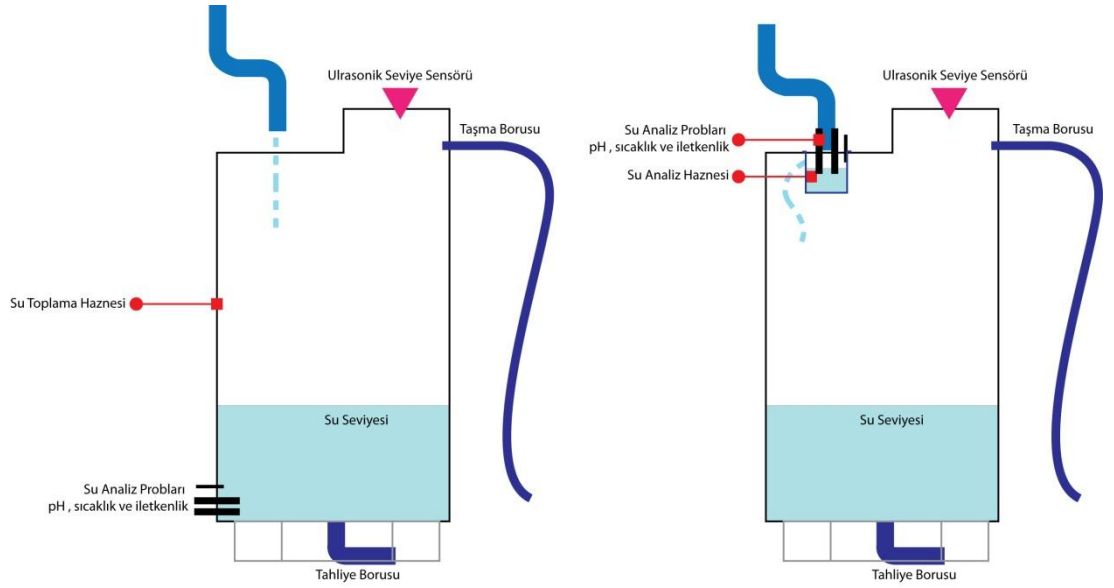
3.3 VERİ TOPLAMA VE DEĞERLENDİRME

Ölçüm dönemi içerisinde sistemden elde edilen verileri üç ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar; meteorolojik veriler (çevresel veriler), çatı sisteminden elde edilen veriler (çatı sistemindeki sıcaklık, yetiştirme ortamındaki nem miktarı ve iç mekan koşulları) ile su kalitesi ve yüzeysel akış (yüzeysel akış, pH, iletkenlik vb.) verileridir.

Çalışmada kullanılan 3 eksenli ultrasonik anemometre çatı yüzeyinden 200 cm yukarıya, paslanmaz çelik meteoroloji direği üzerine yerleştirilmiştir. Çatı yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılan kızılötesi sıcaklık ölçerler ve meteoroloji direği üzerine çatı yüzeyinden 100 cm yukarıda yer alacak şekilde konumlandırılmıştır. Çatı yüzeyine gelen ve yansıyan güneş ışınımı miktarının belirlenmesi için kullanılan piranometreler çatı yüzeyinden 100 cm yukarıda yer almaktadır. Devrilen kovalı yağışölçer, çatı üzerine meteorolojik etmenlere açık bir konumda yerleştirilmiştir.

Çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri, termočiftlerle (termokupl) ölçülmektedir. İç mekan sıcaklık ölçümleri dijital termometre ve nemölçerler ile gerçekleştirilmektedirler.

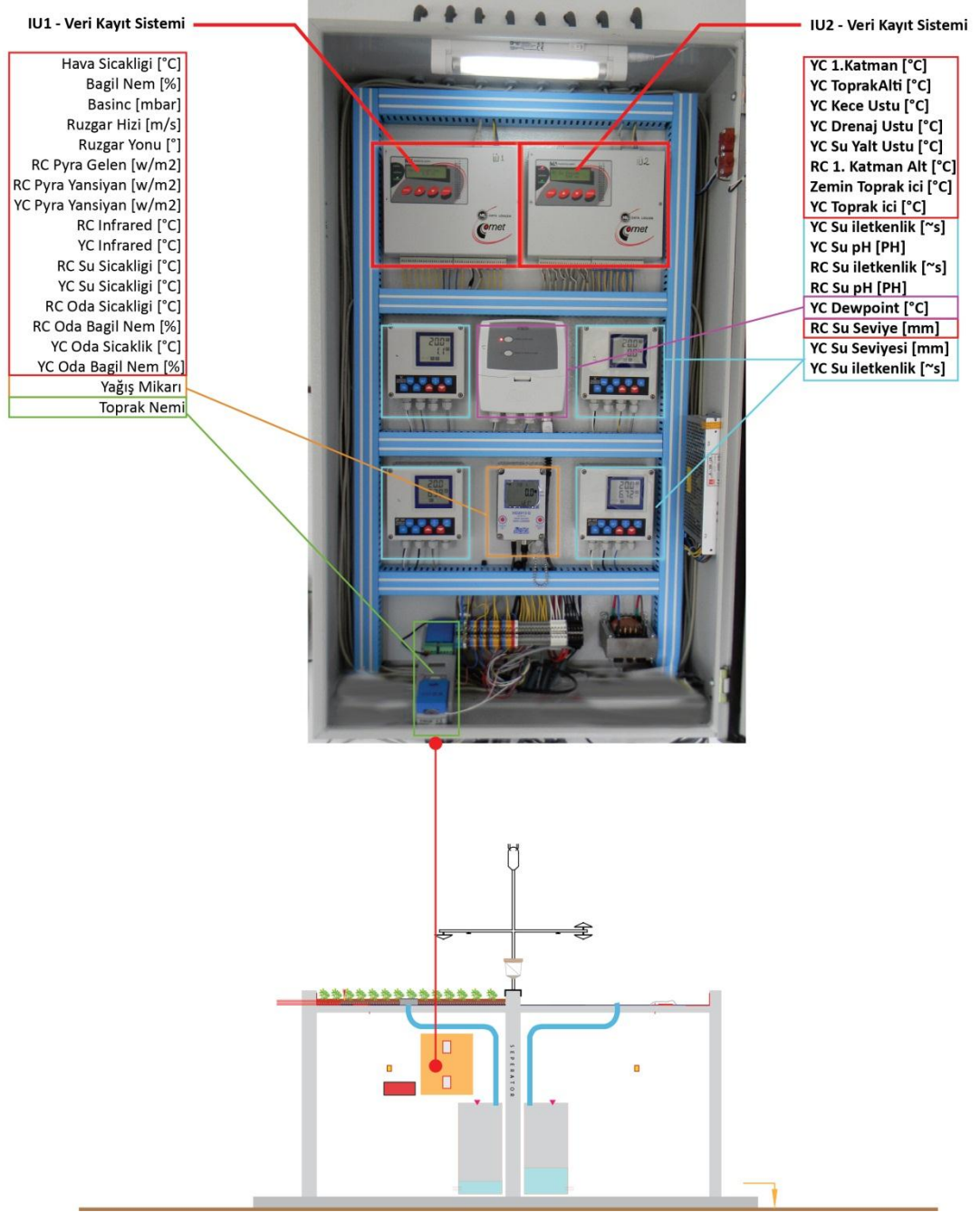
Çatı sistemlerinden tahliye edilen suyun pH ve elektrik iletkenliği ölçümleri, dijital olarak veri toplama sistemine kayıt edilmektedir. Aynı zamanda yağış sırasında su haznelerinde oluşan su yükselmesi ultrasonik seviye sensörü yardımıyla belirlenmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Deneme sahasında bulunan su hazneleri ve ölçüm sistemi. 13 Temmuz 2011 öncesi (solda) ve sonrası (sağda)

Yüzeysel akışla ilgili detaylı verilere ulaşmak için yağışlı günler için 15 dakikalık verilerden elde edilen grafikler kullanılmıştır. Su kalitesi ölçümlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi için çalışmanın başında kullanılan ölçüm sistemi üzerinde 13 Temmuz 2011 tarihinde değişiklik yapılmıştır. Her yağış sonrasında deneme sahasındaki su hazneleri boşaltılarak, yeni yağışlarla oluşan pH, iletkenlik ve yüzeysel akış değerleri belirlenmiştir.

Çalışma sırasında Şekil 3.15’de gösterilen veri depolama sisteminden 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. Çalışma sırasında elde edilen ölçümler, “İÜYÇAP Veri Kayıt Sistemi”ne otomatik olarak kayıt edilmektedir. Sistemden elde edilen veri tipleri Tablo 3.2’de belirtilmiştir.



Şekil 3.15: İÜYÇAP veri kayıt sistemi ve sistem bileşenleri

Tablo 3.2: Sistemden elde edilen veri tipleri ve ölçüm aralıkları

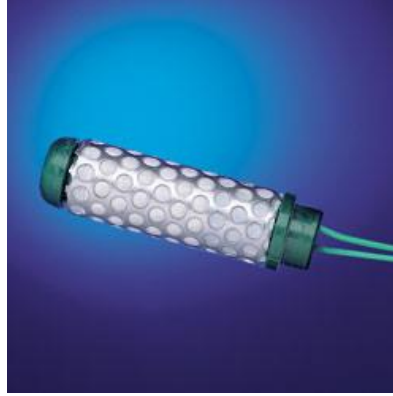
	Kısaltma	Açıklama	Tipi	Birimi	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Ekipmanı	Ölçüm Hassasiyeti / Sertifikasyon
1	YC1	Yeşil çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı/Yeşil çatının en alt noktasının sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
2	YC SU YAL	Yeşil çatının altında bulunan su yalıtımının üzerindeki sıcaklık.	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
3	YC KU	Yeşil çatının altında bulunan su tutucu keçenin sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
4	YC DRN	Yeşil çatının altında bulunan drenaj levhasının sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
5	YC F	Yeşil çatının altında bulunan filtre örtüsünün sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
6	YC YET	Yeşil çatının yetiştirme ortamı sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
7	RC 1	Referans çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı/Referans çatının en alt noktasının sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
8	TOP	Yapının bulunduğu zeminin içindeki toprak sıcaklığı	Sıcaklık	°C	1 Saat	Termokupl	±0,25 / ±0,5°C
9	YC Su iletkenlik	Yeşil çatıdan tahliye olan suyun iletkenlik değeri	İletkenlik	µs	1 Saat	Dijital Elektrik İletkenliği Ölçüm Cihazı	
10	YC Su pH	Yeşil çatıdan tahliye olan suyun pH değeri	pH	pH	1 Saat	Dijital pH ölçer	
11	RC Su iletkenlik	Referans çatıdan tahliye olan suyun iletkenlik değeri	İletkenlik	µs	1 Saat	Dijital Elektrik İletkenliği Ölçüm Cihazı	
12	RC Su pH	Referans çatıdan tahliye olan suyun pH değeri	pH	pH	1 Saat	Dijital pH ölçer	
13	YC Su Seviye	Yeşil çatıdan tahliye olan suyun tahliye hızı		mm	15 dakika	Seviye Sensörü	
14	RC Su Seviye	Referans çatıdan tahliye olan suyun tahliye hızı		mm	15 dakika	Seviye Sensörü	
15	HSC	Çatının bulunduğu konumdaki hava sıcaklığı	Sıcaklık	°C	Seçilen saatler (7,14,21)	3 Eksenli Ultrasonik Meteoroloji İstasyonu	±1°C
16	RH%	Çatının bulunduğu konumda havadaki bağıl nem	Nem	%	1 Saat	3 Eksenli Ultrasonik Meteoroloji İstasyonu	±1%
17	Basınç	Atmosferik Basınç	Basınç	bar	1 Saat	3 Eksenli Ultrasonik Meteoroloji İstasyonu	±1 bar
18	Rüzgar Hızı	Çatı üzerindeki rüzgar hızı	Hız	m/s	1 Saat	3 Eksenli Ultrasonik Meteoroloji İstasyonu	±1 m/s
19	Rüzgar Yönü	Çatıya etki eden rüzgarın yönü	Yön	Derece	1 Saat	3 Eksenli Ultrasonik Meteoroloji İstasyonu	±1°
20	Güneş Işınımı	Çatıya güneşten gelen ışık enerjisi miktarı	Solar radyasyon	w/m ²	1 Saat	Piranometre	ISO 9060/WMO
21	RC PYR	Referans çatıda oluşan yansıma miktarı	Solar radyasyon	w/m ²	1 Saat	Piranometre	ISO 9060/WMO

	Kısaltma	Açıklama	Tipi	Birimi	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Ekipmanı	Ölçüm Hassasiyeti / Sertifikasyon
22	YC PYR	<i>Yeşil çatıda oluşan yansıma miktarı</i>	Solar radyasyon	w/m ²	1 Saat	Piranometre	ISO 9060/WMO
23	RC YZY	<i>Referans çatının yüzey sıcaklığı</i>	Sıcaklık	°C	1 Saat	Kızılötesi Termometre	±0,2°C
24	YC YZY	<i>Yeşil çatının yüzey sıcaklığı</i>	Sıcaklık	°C	1 Saat	Kızılötesi Termometre	±0,2°C
25	RC ODA	<i>Referans çatının altında bulunan odanın sıcaklığı</i>	Sıcaklık	°C	1 Saat	Dijital Termometre	±0,4°C
26	YC ODA	<i>Yeşil çatının altında bulunan odanın sıcaklığı</i>	Sıcaklık	°C	1 Saat	Dijital Termometre	±0,4°C
27	RC Oda Bağıl Nem	<i>Referans çatının altında bulunan odadaki bağıl nem</i>	Nem	%	1 Saat	Dijital Higrometre	±0,4%
28	YC Oda Bağıl Nem	<i>Yeşil çatının altında bulunan odadaki bağıl nem</i>	Nem	%	1 Saat	Dijital Higrometre	±0,4%
29	Yağış	<i>Yağış miktarı</i>	Yağış	mm	5 dk. – 1 gün arası değişebilen aralıklarda	Devrilen kovalı yağışölçer	±2%
30	Toprak Nemi	<i>Yeşil çatının yetiştirme ortamındaki nem miktarı / santibarik basınç</i>	Santibarik basınç	cbar	30 dk.	Toprak nem sensörü	ISO 9869
31	YC HF	<i>Yeşil çatının bulunduğu bölümdaki ısı akısı</i>	Isı Akısı	w/m ²	10 dk'lık ve günlük olarak	Isı akısı ölçüm sistemi	ASTM C1155 / C1046
32	RC HF	<i>Referans çatının bulunduğu bölümdaki ısı akısı</i>	Isı Akısı	w/m ²	10 dk'lık ve günlük olarak	Isı akısı ölçüm sistemi	ISO 9869 ASTM C1155 / C1046

Toprakta suyun tutulma gücü veya tutulma enerjisi ölçü birimleri, "atmosfer", "bar" ve "pF" deyimlerinden biri ile ifade edilmektedir. 1 cm²'lik yüzeye yapılan 1000 gramlık basınca "atmosfer", 1033 gramlık basınca ise "bar" denmektedir. Bu tanımlamaya göre "toprakta su, 15 atm'lık basınçla tutuluyor" dendiğinde, topraktan bu suyu bitkilerin alabilmesi için, 15 atmosferlik bir emme basıncı geliştirmesi gerekmektedir(Çepel, N., 1993).

Çalışmada kullanılan toprak nem sensörü, yüzeyden 2 – 3 cm. derinde ve yatay konumda yerleştirilmiştir. Kullanılan sensör, genellikle toprak şartlarında çalışmak üzere üretilmiş, elektriksel direnç sensörü ya da elektronik tansiyometre olarak tanımlanan bir sensördür (Şekil 3.16). Bu sensörlerin dünyada çok yaygın bir kullanımı bulunmaktadır. Yeşil çatı sisteminin yetiştirme ortamı iri taneli bir yapıya sahiptir ve taneler arasında hava boşlukları bulunmaktadır. Bu durumun, toprakta elde edilecek

nem değerlerine göre bazı farklılıklar oluşturabilmesi olasıdır. Ancak dünyada yeşil çatılar için özel bir nem sensörü bulunmamaktadır.



Şekil 3.16 – Çalışmada kullanılan toprak nem sensörü (Anonim,2011d)

Yetiştirme ortamındaki nem ölçümleri, santibar (cbar=0,01 bar) cinsinden kaydedilmektedir. Çalışmada kullanılan toprak nem sensörü 0 – 200 cbar aralığında ölçüm yapmaktadır. Ölçülen değerlerin yüksek çıkması, toprağın nem tutma enerjisinin yüksek olduğunu, bitkilerin yetiştirme ortamındaki suyu bünyelerine alabilmek için daha çok enerji sarf etmeleri gerektiğini, dolayısıyla da topraktaki nem içeriğinin azaldığını ifade etmektedir. Eğer elde edilen değer düşükse, bitkiler topraktan suyu kolayca alabilmektedirler.

Çalışmada, elde edilen sıcaklık verilerinin dağılımının ve çatı sisteminde oluşan etkilerin detaylı bir biçimde değerlendirilebilmesi için günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri de çalışmaya eklenmiştir. Günlük döngü (diurnal cycle) hesaplamaları, x ekseninde saatleri (1-24), y ekseninde o ay içindeki her günün aynı saat için ortalamasını (her saat için 30 günün o saatteki ölçümlerinin ortalama değeri) içerek şekilde oluşturulmuş ve grafiklere aktarılmıştır.

Bitkisel gelişimin belirlenebilmesi amacıyla 1-3 haftalık aralıklarla yeşil çatı sisteminden elde edilen fotoğraflar ve deney sahası ile ilgili diğer gözlemler tez çalışmasında yer almaktadır.

Tez çalışması sırasında, yapılan karşılaştırmalı ölçümler ve bu ölçümlerden türetilen veriler yardımıyla, yeşil çatıların İstanbul iklim koşullarında kent ve bina düzeyindeki

rollerinin aşağıda belirlenen konular kapsamında araştırılması hedeflenmiştir. Bu konular;

- Yeşil çatının konumdaki meteorolojik verilerin, çatı sistemine olan etkisinin değerlendirilmesi,
- Yeşil çatıların yapının ısı yalıtımına olan etkileri, beklenen ve elde edilen enerji tasarrufu,
- Yeşil çatı sisteminin iklim ve çevresel etmenlerle olan etkileşimi, sıcaklık profili,
- Yeşil çatıların yapının iç ortam kalitesine olan etkileri,
- Yeşil çatıların kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasındaki etkilerinin belirlenmesi (Kent ortamında güneş yansıtma ve sıcaklık soğurma yeteneklerinin değerlendirilmesi - güneş ışınlarını yansıtma oranları, yüzey sıcaklığı, çevresel faktörlerle ilişkileri),
- Yeşil çatının yetiştirme ortamındaki nem oranının değerlendirilmesi
- Yüzeysel akışın belirlenmesi,
- Tahliye olan su kalitesinin belirlenmesi,
- Bitki örtüsünün çatıyı kaplama oranının izlenmesi,
- Yeşil çatı sisteminin İstanbul ikliminde sürdürülebilirliğinin denetlenmesi,

Olarak sıralanabilirler.

4. BULGULAR

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. Ölçüm sisteminden elde edilen verilerle ilgili genel değerlendirme yapılmıştır. Çalışma sırasında yapılan ölçümlerin genel değerlendirilmesi Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Elde edilen verilerle ilgili istatistikler

Açıklama	Ölçülen Değer	Birim
Ölçüm Yapılan Gün Sayısı	382,0	Gün
Yağışsız Gün Sayısı	226,0	Gün
En Fazla Ardışık Yağışsız Gün Sayısı	40	Gün
En yağışlı gün	04.05.2011	40,6 mm
Toplam Yağış Miktarı	689,3	mm/m ²
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 Yetiştirme Ortamı Sıcaklığı	35,5	°C
Günlük Ortalama Yetiştirme Ortamı Sıcaklığı	14,9	°C
En Düşük Günlük Ortalama Yetiştirme ortamı Sıcaklığı	0,4	°C
Yetiştirme Ortamındaki En Yüksek Ortalama Nem Miktarı	8,1	cbar
Yetiştirme Ortamının Günlük Ortalama Nem Miktarı	93,9	cbar
Yetiştirme Ortamındaki En Düşük Ortalama Nem Miktarı	200,0	cbar
Ortalama Rüzgar Esiş Yönlerine Göre Hakim Rüzgar Yönü	Batı	Yönü
En Yüksek Günlük Ortalama Rüzgar Hızı	15,0	km/saat
En Düşük Günlük Ortalama Rüzgar Hızı	4,4	km/saat
En Yüksek Günlük Ortalama Rüzgar Hızı ve Yönü	G	Yönü
Yeşil Çatıda Oluşan Günlük Ortalama Isı Transferi	-2,1	w/m ²
Referans Çatıda Oluşan Günlük Isı Transferi Ortalaması	-7,6	w/m ²

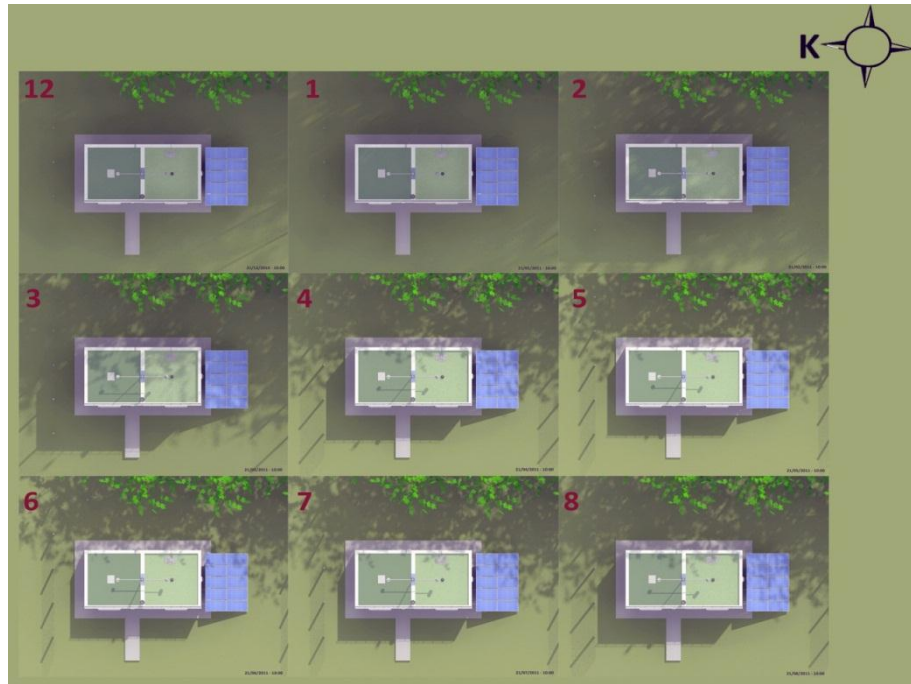
Çalışma sonucunda elde edilen veriler, meteorolojik veriler, çatı sisteminden elde edilen veriler ve yüzeysel akış ile ilgili veriler olarak 3 sınıfta incelenmiştir.

4.1 İKLİMSEL VERİLER

Çalışma sırasında elde edilen meteorolojik ölçümler, yapıya etki eden meteorolojik faktörler ile çevresinde oluşan mikroklimatik değişimleri belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Deneme alanının konumu incelendiğinde, Doğu yönü yüksek şev ve ağaçlık alanla kaplıdır. Güney, Batı ve Kuzey Batı kesimleri ise meteorolojik etkenlere açıktır. Bu yönden etki eden meteorolojik etkenleri engellemektedir. Çalışma sırasında ölçülen güneşlenme ve rüzgar yönleri, deneme alanının konumu nedeniyle bölgesel değerlere göre yer yer farklılıklar göstermiştir.

Yapının çatı yüzeyi, kış aylarında daha geç olmakla birlikte, genellikle 09.30 – 11.30 saatlerinde güneş görmeye başlamakta ve bu durum güneş batana kadar devam etmektedir. Şekil 4.1’de, Aralık – Ağustos döneminde, her ayın 21. gününde saat 10:00 itibariyle yapı yüzeyinde oluşan güneşlenme analizi gösterilmiştir.

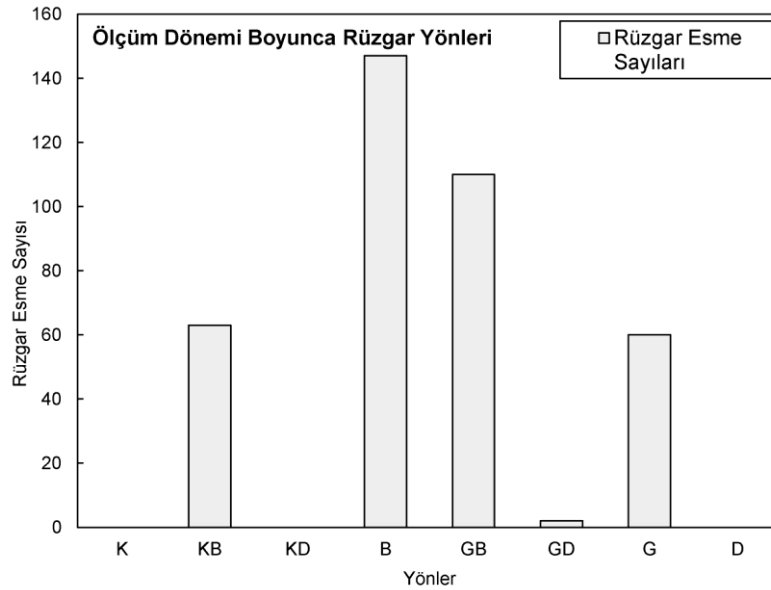


Şekil 4.1: Deneme alanının aylara göre güneşlenme durumu

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, Şubat ayına kadar çatı yüzeyleri gölgede kalmakta, Mart ayı ile birlikte güneşlenme miktarı artmaktadır. Çevredeki ağaçların bahar aylarındaki yapraklanma durumları da güneşlenmeyi etkilemektedir.

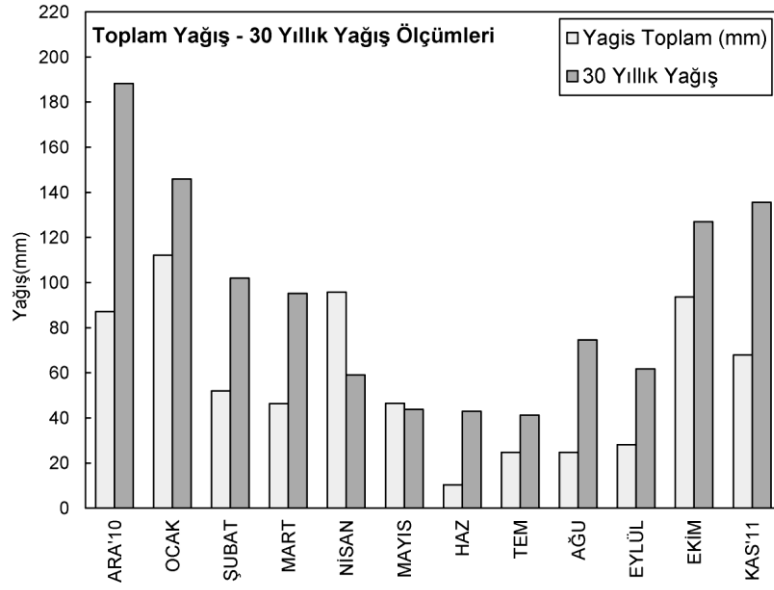
Yapıya etki eden rüzgar yönleri incelendiğinde, yapının konumu nedeniyle Kuzeydoğu ve Doğu yönünden rüzgar almadığı belirlenmiştir. Ölçüm dönemi boyunca yapıya etki eden hakim rüzgar yönü Batı yönünden esen Günbatısı olarak belirlenmiştir. En çok esme sayısına sahip ikinci rüzgar yönü ise İstanbul ölçeğinde esme sayısı en fazla 2. rüzgar yönü olarak bilinen ve GB yönünden esen Lodos rüzgarı olmuştur(Şekil 4.2). Rüzgar esme sayıları aylara göre incelendiğinde;

- Kasım, Aralık, Ocak, Mart ve Ekim aylarında hakim rüzgar “GB” yönünden
- Diğer aylarda ise “B” yönünden esmiştir. Deneme alanında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen rüzgar yönleri Şekil 4.2’de belirtilmiştir.
- Hakim rüzgar yönü “B” yönü olarak kaydedilmiştir.
- En yüksek rüzgar hızı 27 Kasım 2010 tarihinde 26,28 km/saat olarak ölçülmüştür.



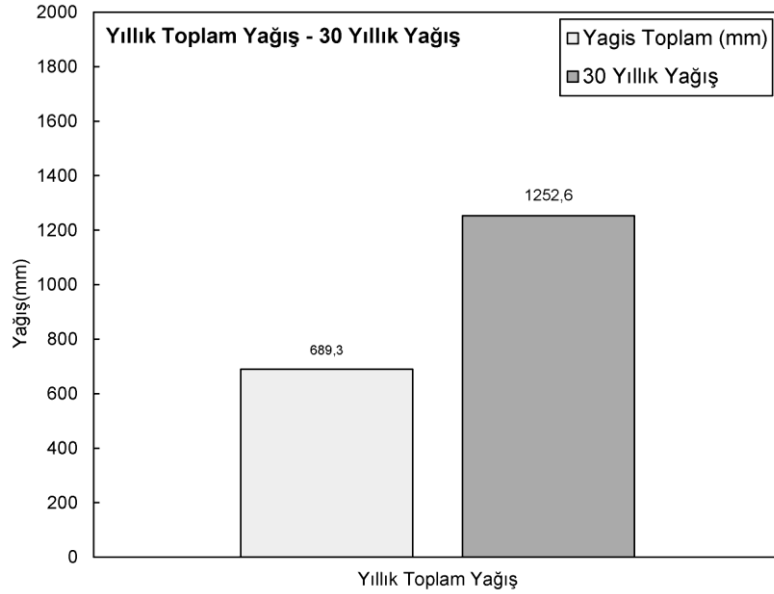
Şekil 4.2: Rüzgar esme sayıları

Çalışma sırasında, yağış ölçümlerine 09.12.2010 tarihinde başlanmıştır. Bu ölçümler, her iki çatıdan tahliye olan suyun, yetiştirme ortamındaki nem miktarının ve çevresel iklim özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Şekil 4.3’de aylara göre oluşan yağış miktarının 30 yıllık yağış verileriyle karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Aylık ortalama yağış miktarının 30 yıllık verilerle karşılaştırılması

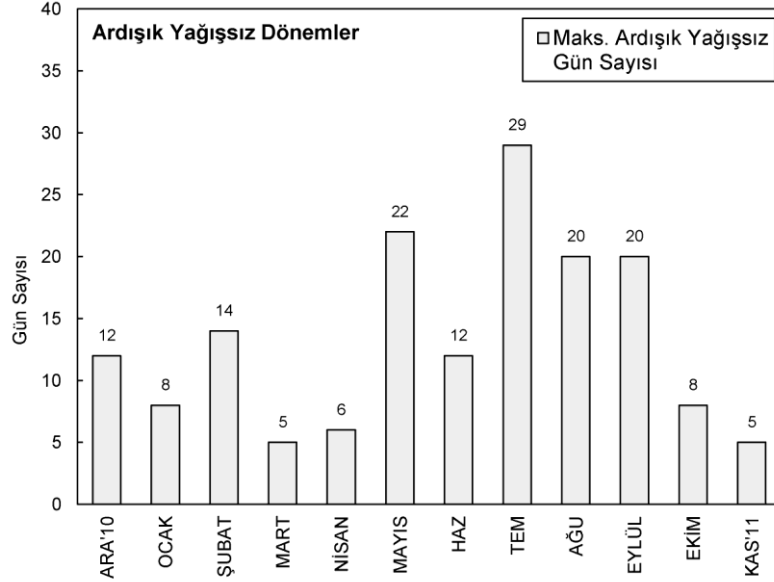
Çalışma sırasında ölçülen aylık toplam yağış değerleri, ölçüm döneminin iklim normallerine göre daha kurak geçtiğini göstermektedir. Aylık ölçümlerde, sadece 2011 yılı Nisan ve Mayıs aylarının mevsim normallerinden daha yağışlı geçtiği görülmektedir. Ölçüm dönemi boyunca kaydedilen toplam yağış miktarı ($689,3 \text{ mm/m}^2$) iklim normallerinden ($1252,6 \text{ mm/m}^2$) %45,3 oranında daha düşüktür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Yıllık ortalama yağış miktarının 30 yıllık verilerle karşılaştırılması

Ölçüm dönemi içerisindeki ardışık yağışsız günlerde oluşan kurak dönem, yeşil çatı üzerinde bulunan bitki örtüsünün gelişimini etkilemektedir. Sıcak aylarda yetiştirme ortamındaki nem değerinin azalması ve bitkilerin ciddi bir stres altına girmesine neden

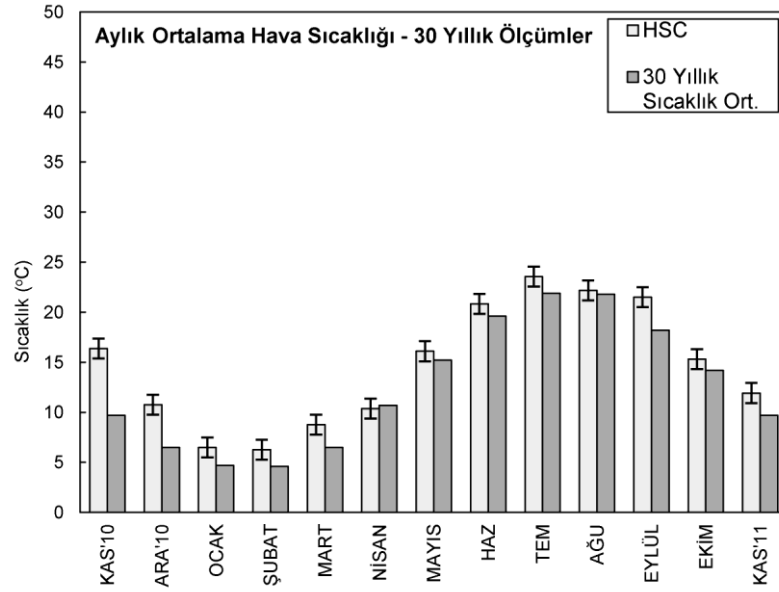
olmaktadır. Bitkilerin ardışık yağışsız günlerde hayatta kalabilmeleri, sulama sistemi içermeyen ekstensif yeşil çatı sistemlerinde önem taşımaktadır. Çalışma dönemindeki maksimum ardışık yağışsız günler belirlenerek grafiklere aktarılmıştır(Şekil 4.5).



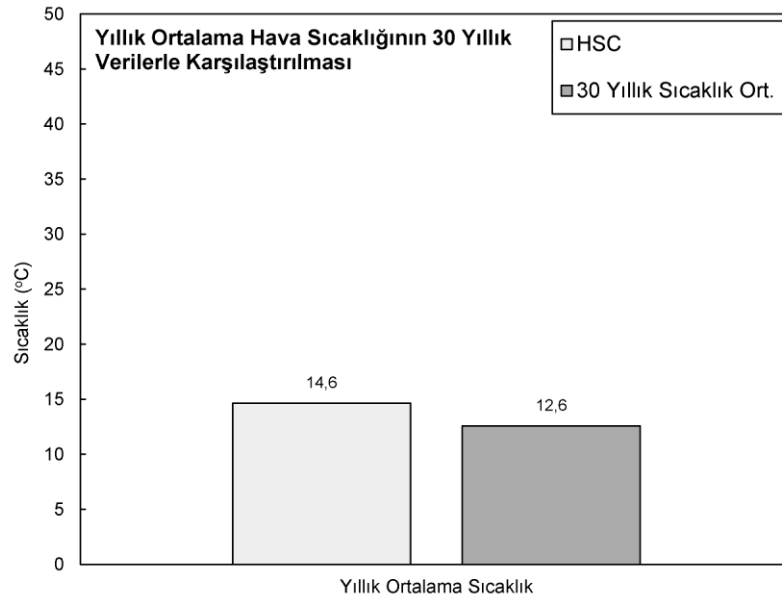
Şekil 4.5: Aylara göre ardışık yağışsız günlerin sayısı

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. Hava sıcaklığı ölçümleri, Tablo – 3.2’de belirtildiği gibi saatlik olarak elde edilmiştir. Ancak 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 4.6’da gösterilmiştir. Çalışma sırasında elde edilen hava sıcaklığı değerleri ile 30 yıllık veriler arasındaki istatistiksel ilişki Pearson Korelasyon Testi ile belirlenmiştir. İki veri seti arasında güçlü bir korelasyon olduğu (0,956) $\alpha=0.05$ güven aralığında ortaya konulmuştur.



Şekil 4.6: Ölçülen aylık sıcaklık ortalamaları ile 30 yıllık verilerin karşılaştırılması



Şekil 4.7: Ölçülen yıllık sıcaklık ortalaması ile 30 yıllık verilerin karşılaştırılması

Çalışma dönemindeki hava sıcaklığı iklim normallerinden daha yüksek seyretmiştir (Şekil 4.6 ve 4.7). Genel sıcaklık ortalaması incelendiğinde, çalışma dönemdeki hava sıcaklığının iklim normallerine göre $2,0^{\circ}\text{C}$ daha sıcak olduğu görülmektedir. Çalışma döneminde 2010 yılı Kasım ve Aralık aylarında elde edilen hava sıcaklığı ölçümleri mevsim normallerinden belirgin şekilde farklılık göstermiş ve $4-7^{\circ}\text{C}$ daha yüksek ölçülmüştür.

4.2 ARAŞTIRMA ALANINDAN ELDE EDİLEN FİZİKSEL VERİLER

Tez çalışmasında, 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. Ölçüm döneminde çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık verileri ile ilgili istatistikler Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 - Çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri (°C)

Kısaltma	Gün Sayısı	Günlük Ort.	St. Ort.	St. Sapma	Min.	Maks.
YÇ ODA	382	15,7	0,4	7,3	3,4	28,7
YÇ1	382	15,2	0,4	8,2	2,2	30,2
YÇ SU YAL	382	15,0	0,4	8,4	1,9	30,3
YÇ KU	382	15,0	0,4	8,5	1,7	31,1
YÇ DRN	382	14,7	0,5	9,1	1,0	33,2
YÇ FIL	382	14,6	0,5	9,1	0,8	33,1
YÇ YET	382	14,9	0,5	9,8	0,4	35,5
YÇ YZY	382	12,9	0,5	9,6	-2,7	33,1
RÇ ODA	382	15,5	0,4	7,7	2,9	29,2
RÇ 1	382	16,8	0,5	10,3	0,4	37,0
RÇ YZY	382	14,3	0,5	10,7	-3,6	35,5
HSC	382	14,7	0,3	6,5	0,5	25,9

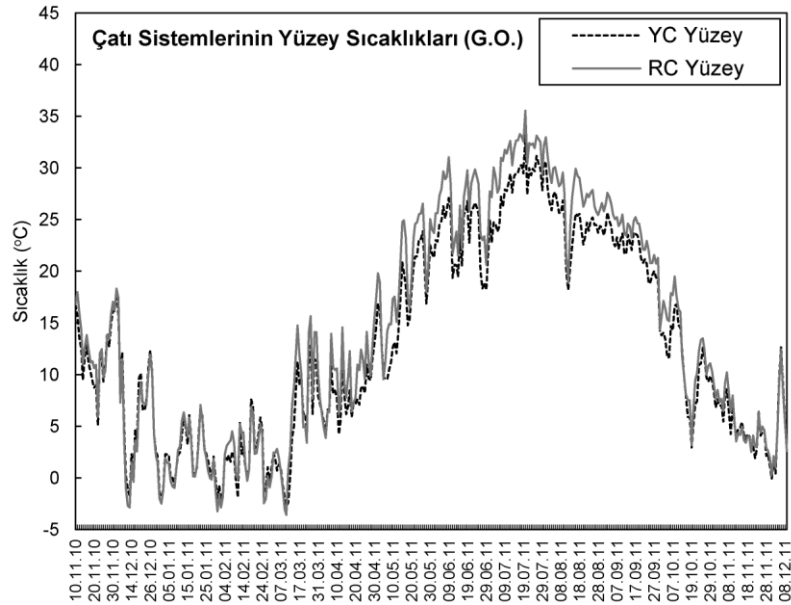
4.2.1 Çatı Sistemlerinde Oluşan Isı, Sıcaklık ve Çevresel Etkiler

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.

Çatı sistemlerinden elde edilen sıcaklık ölçümleri, günlük ortalama, aylık ortalama, günlük döngü ve mevsimlik ortalamalar olarak incelenmiştir. Elde edilen ölçüm değerlerinin normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov Testi ile %95 güven

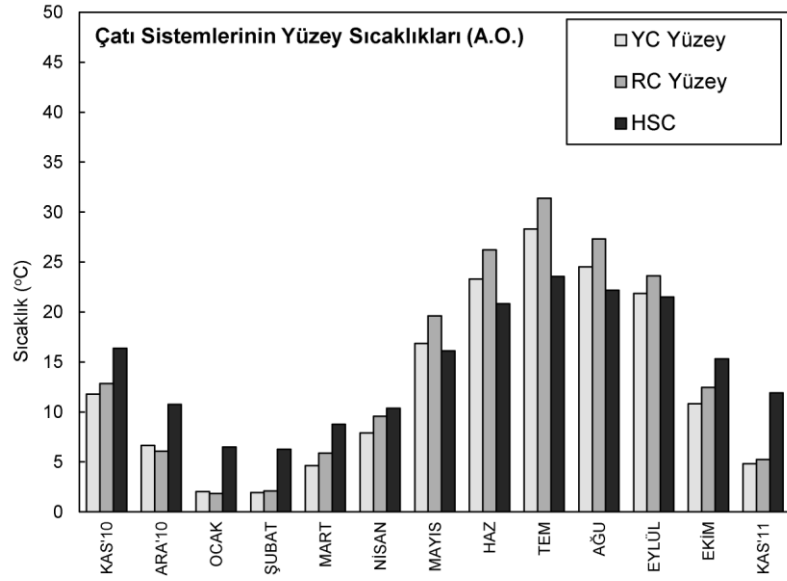
düzeyinde denetlenmiştir. Günlük ortalamalar normal dağılım göstermezken, aylık ortalamaların normal dağılıma uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çatı sistemlerindeki sıcaklık değerleri incelenirken, öncelikle çatı sistemlerinin yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.8’de çalışma sırasında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen günlük ortalama değerler görülmektedir. 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 4.8). Genel ortalama da yeşil çatı yüzey sıcaklığı referans çatıdan $1,4^{\circ}\text{C}$ daha düşük sıcaklık değerine sahiptir.



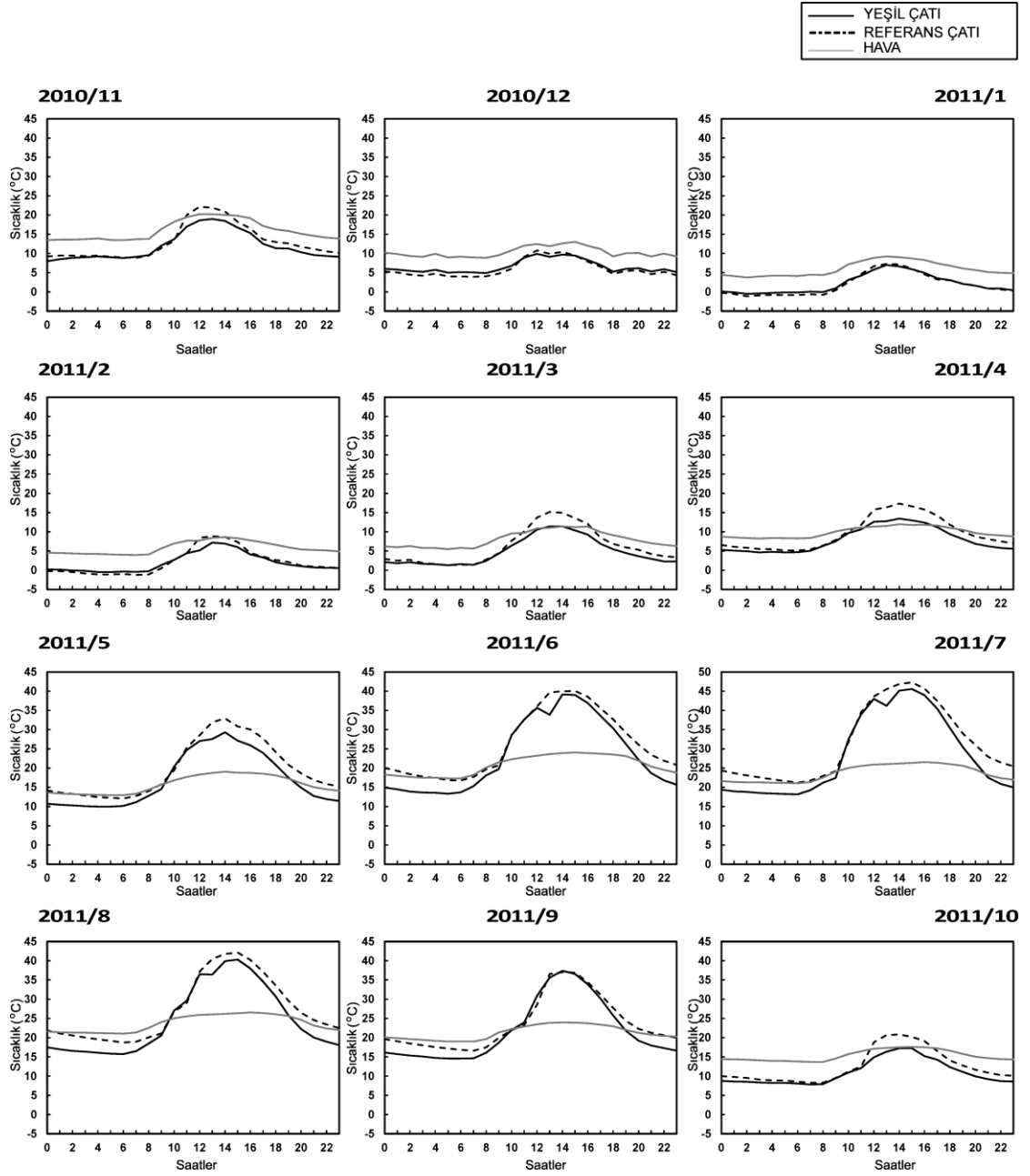
Şekil 4.8: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıkları (Günlük ortalama değerler)

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 (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Çatı sistemlerinin yüzey sıcaklıkları (aylık ortalama değerler)

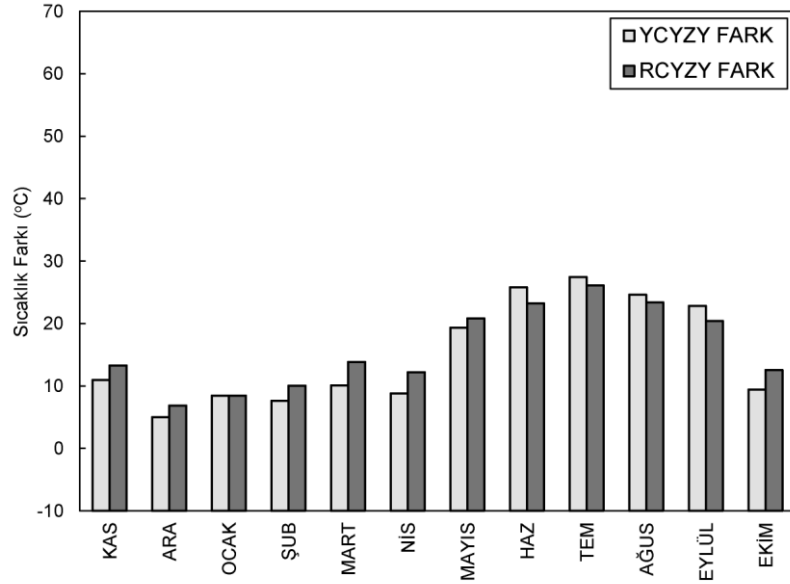
Çatı sistemlerinin yüzey sıcaklıklarındaki sıcaklık dağılımıyla ilgili detaylı bir analiz yapılabilmesi amacıyla, her ayın her saatinin ortalamaları alınarak, günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.10). Günlük döngü grafiklerinde, çatı yüzeylerinin sıcaklıklarının birbirleriyle yakın değerlere sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Kış ve sonbahar aylarında, çatı yüzey sıcaklıkları yakın değerlerde seyretnmiştir. Bitki örtüsünün gelişimine başladığı Nisan ayı ile birlikte çatı yüzeyleri arasındaki fark belirginleşmiş ve yeşil çatının yüzey sıcaklığı referans çatıdan daha düşük değerlerde ölçülmüştür. Ancak kurak dönemlerin etkisiyle Eylül ayında çatı yüzeylerinin sıcaklıkları eşitlenmiştir.



Şekil 4.10: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıklarının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri

Günlük döngü içerisinde, her ayın her gününün tüm saatlerinde oluşan ortalamaları ve bu ortalamaların minimum ve maksimum değerleri arasındaki farklar incelendiğinde, sonbahar ve kış aylarında referans çatı sisteminin yüzey sıcaklığında gün içerisinde oluşan sıcaklık farklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Yaz aylarında ise bu durum tam tersine bir dağılım göstermiş ve yeşil çatının yüzeyinde gün içerisinde daha belirgin sıcaklık farklılıkları oluşmuştur. Yeşil çatı sisteminin yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimi (ay içerisindeki min-maks. değerler farkı) en az 5,0 °C en fazla 27,4°C arasında ölçülürken, referans çatıda oluşan sıcaklık değişimi ise en az 6,8 en fazla 26,1°C

aralığında tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle, referans çatı sisteminin yüzeyinde gün içerisinde oluşan sıcaklık dalgalanmaları yeşil çatıya göre daha düşüktür. Yeşil çatı sisteminin yüzeyi dış etmenlerden daha belirgin bir biçimde etkilenmiştir(Şekil4.11).

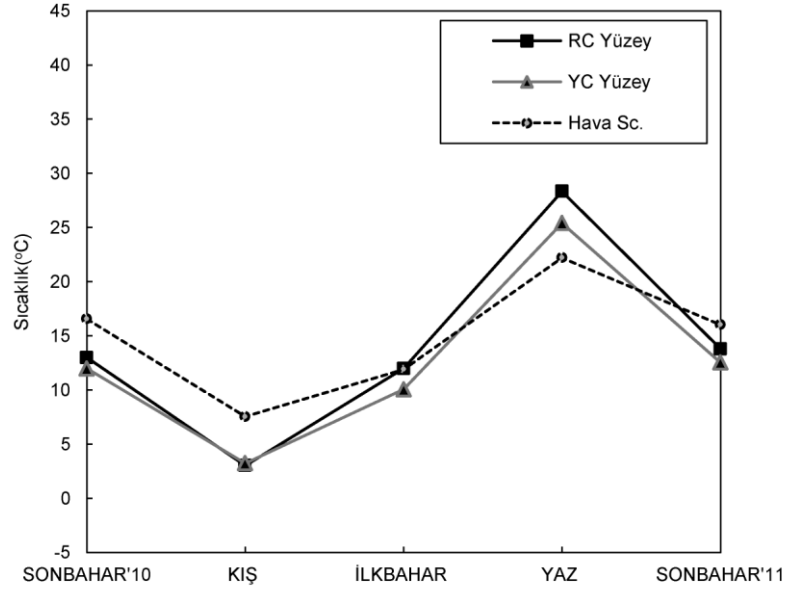


Şekil 4.11 – Aylara göre çatı sistemlerinin yüzey sıcaklıklarında oluşan sıcaklık değişimleri

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.

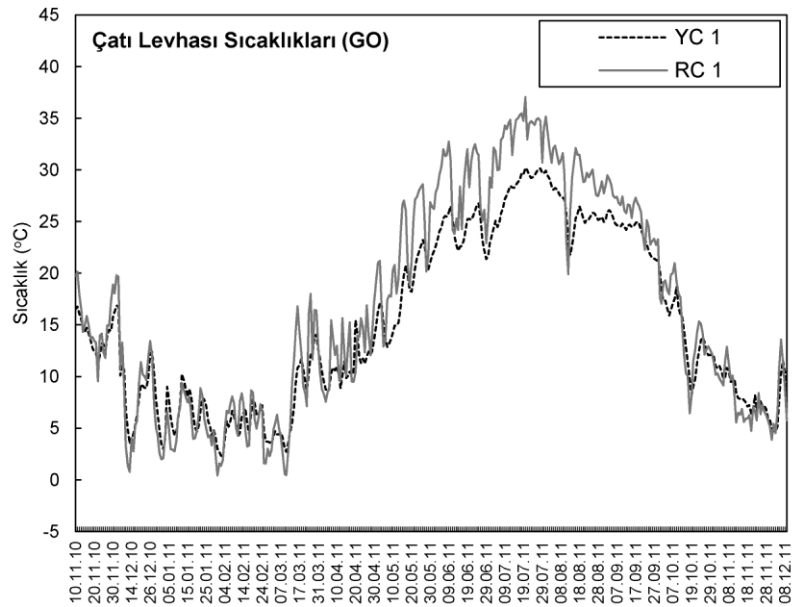
Günlük döngü grafiklerinde, Mayıs ve Ağustos ayları arasında günün 12. ile 14. saatleri arasında yeşil çatının yüzey sıcaklığında bir düşüş belirlenmiştir. Bu düşüşün nedeni yapılan ölçümlerle tespit edilememiştir. Gerçekleşen bu etkinin yeşil çatı sisteminin alt katmanlarındaki suyun buharlaşması ya da çatı üzerindeki bitkilerin CAM faaliyeti nedeniyle olduğu tahmin edilmektedir. Ancak konuyla ilgili daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

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 (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Her iki çatı sisteminin yüzey sıcaklıklarının mevsimlere göre dağılımı

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.



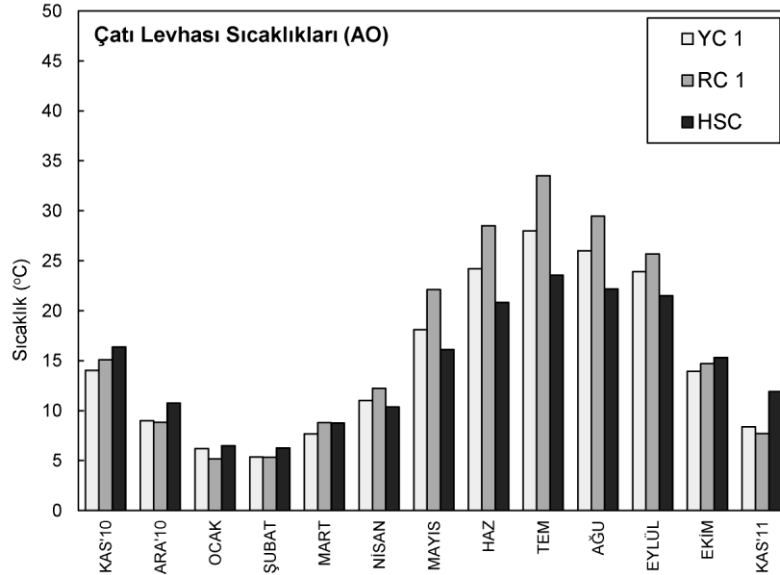
Şekil 4.13: Her iki çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasının günlük ortalama sıcaklık değerleri

Aynı zamanda yapının iç mekan kalitesine de katkıları bulunmaktadır. Her iki çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasının (yapısal tabaka) günlük ortalama sıcaklık dağılımı Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

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

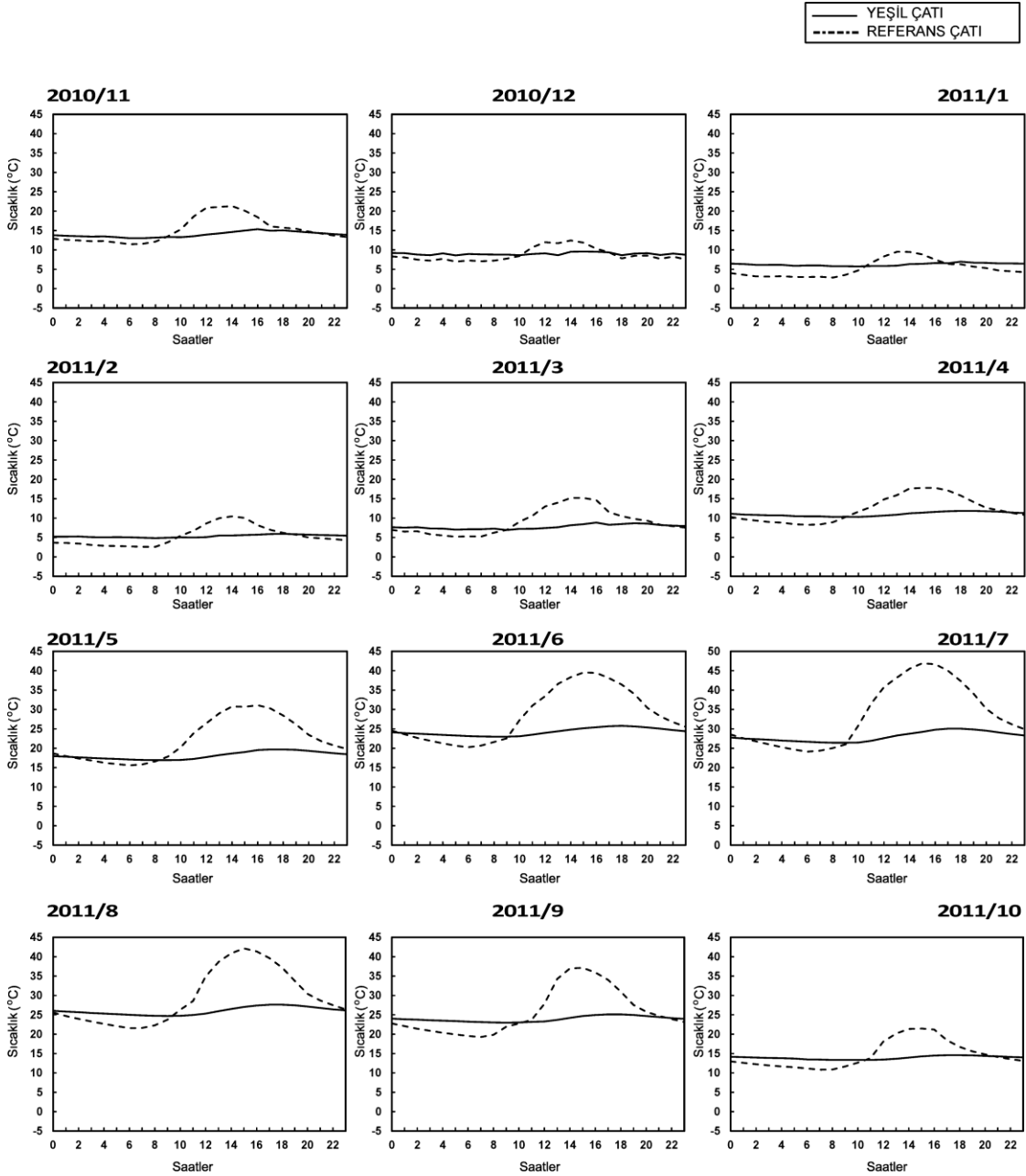
Ölçüm döneminin en sıcak günü olan 20 Temmuz 2011 tarihinde, hava sıcaklığı $25,9^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Bu tarihte yeşil çatının altında bulunan çatı yüzeyinin sıcaklığı $30,2^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülürken, referans çatının altında bulunan yapı kabuğunun sıcaklığı 37°C olarak ölçülmüştür. En soğuk günde, yeşil çatının altında bulunan çatı yüzeyinin sıcaklığı referans çatıdan 2°C daha yüksekken, en sıcak günde 7°C daha düşüktür (Şekil 4.13).

Aylık ortalamalar incelendiğinde ise, soğuk aylarda yeşil çatının altında bulunan yapı yüzeyi sıcaklığının daha yüksek, sıcak aylarda ise daha düşük olduğu görülmektedir(Şekil 4.14).



Şekil 4.14: Her iki çatı sisteminin altındaki çatı yüzeylerinin aylık ortalama sıcaklık değerleri

Çalışma sırasında, çatı sistemlerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin analiz edilmesi amacıyla oluşturulan günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

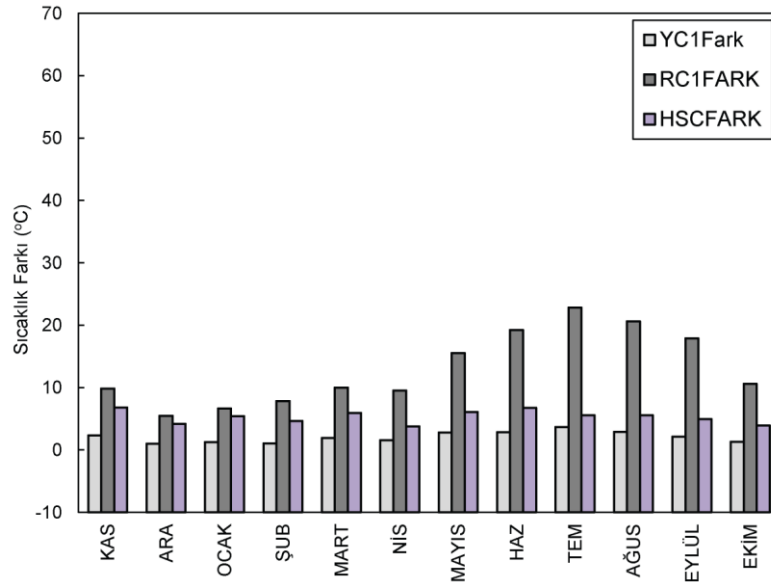


Şekil 4.15: Her iki çatı sisteminin altındaki çatı levhası sıcaklıklarının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri (x=sıcaklık, y=saatler)

Her iki çatı sisteminin altında bulunan çatı levhası sıcaklıkları için oluşturulan günlük döngü grafikleri incelendiğinde, yeşil çatı sisteminin üzerinde bulunduğu çatı levhasına önemli bir koruma sağladığı ve dış ortam etkenlerindeki değişimlerden etkilenmesini engellediği görülmektedir. Yeşil çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı

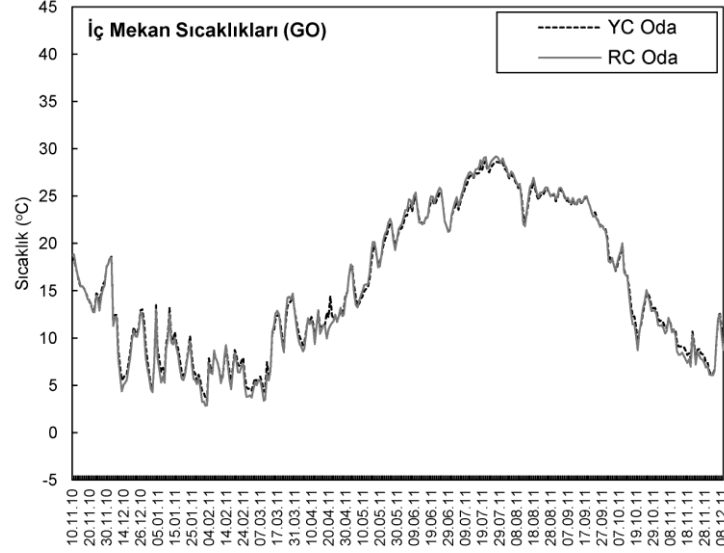
ise durağan bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Referans çatının altında bulunan yapı levhasında daha hızlı bir ısınma-soğuma döngüsün gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yeşil çatı sisteminin altında bulunan çatı levhasında sıcaklık dalgalanmaları $1,0-3,7^{\circ}\text{C}$ ile sınırlı kalırken, referans çatının altında bulunan çatı levhasındaki sıcaklık dalgalanmaları (ay içerisindeki min-maks. değerler farkı) $5,5-22,8^{\circ}\text{C}$ arasında değişmiştir (Şekil 4.15). Buna ek olarak, yeşil çatının altında bulunan çatı levhasındaki sıcaklık dalgalanmalarının hava sıcaklığından %35-77 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

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 (Şekil 4.16).



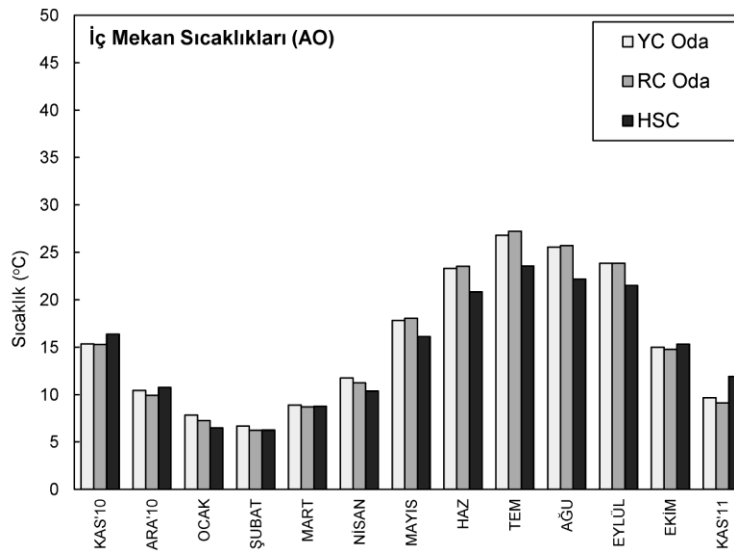
Şekil 4.16 – Aylara göre çatı sistemlerinin altındaki çatı levhalarında oluşan sıcaklık dalgalanmaları

Her iki çatı sisteminin, üzerinde bulundukları odaların iç mekan kalitelerine olan etkilerinin belirlenmesi için, iç mekan sıcaklık ölçümleri de çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Günlük ortalama iç mekan sıcaklıkları Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



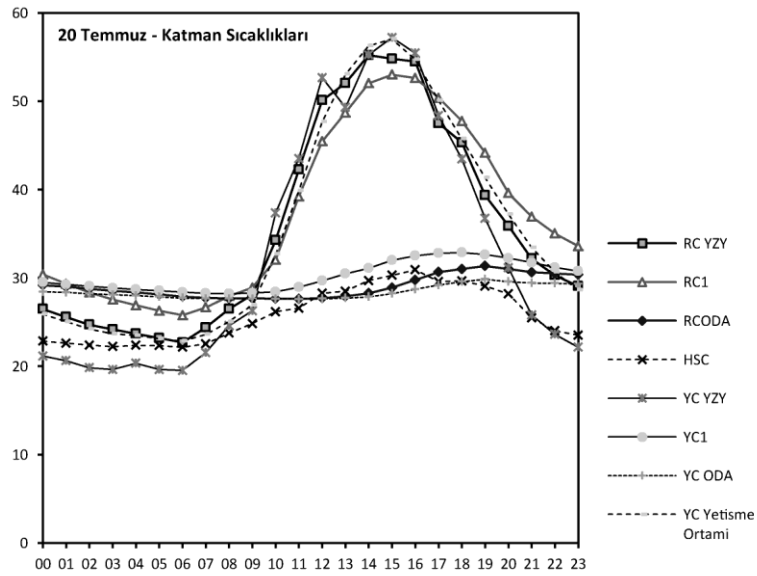
Şekil 4.17 – İç mekan sıcaklıklarının günlük ortalama değerleri

Ölçüm döneminde elde edilen iç oda sıcaklıkları ölçümleri çok yakın değerlere sahiptir. Bu değerler arasında anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen günlük ortalama değerlerin normal dağılıma sahip olmaması nedeniyle, %95 anlamlılık düzeyinde yapılan Mann-Whitney U Testi sonucunda iki oda sıcaklığı arasında anlamlı bir farka rastlanmamıştır. İç mekan sıcaklık değerlerinin aylara göre dağılımı Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18: İç mekan sıcaklıklarının aylık ortalama değerleri

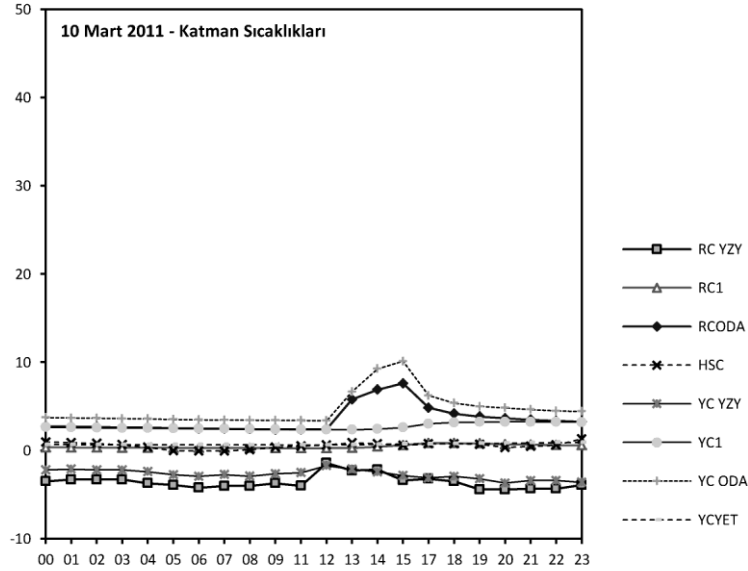
Çalışma sırasında en düşük günlük ortalama hava sıcaklığı 10 Mart 2011, en yüksek günlük ortalama hava sıcaklığı ise 20 Temmuz 2011 tarihinde ölçülmüştür. En sıcak gün olan 20 Temmuz 2011 tarihinde, gün içerisindeki en yüksek sıcaklık saat 16.00'da $30,9^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Aynı saatte çatı katmanlarından elde edilen en yüksek değer, $55,4^{\circ}\text{C}$ 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. Yeşil çatının yüzeyinde oluşan şiddetli sıcaklık dalgalanmalarını alt katmanlara olan etkisi yeşil çatı sistemi tarafından azaltılmıştır ve yeşil çatının altında yer alan yapısal katmanlarda yüzey sıcaklığına göre $10-15^{\circ}\text{C}$ 'lik bir azalma kaydedilmiştir. (Şekil 4.19).



Şekil 4.19: En sıcak gün içerisinde çatı katmanlarının sıcaklık dağılımları

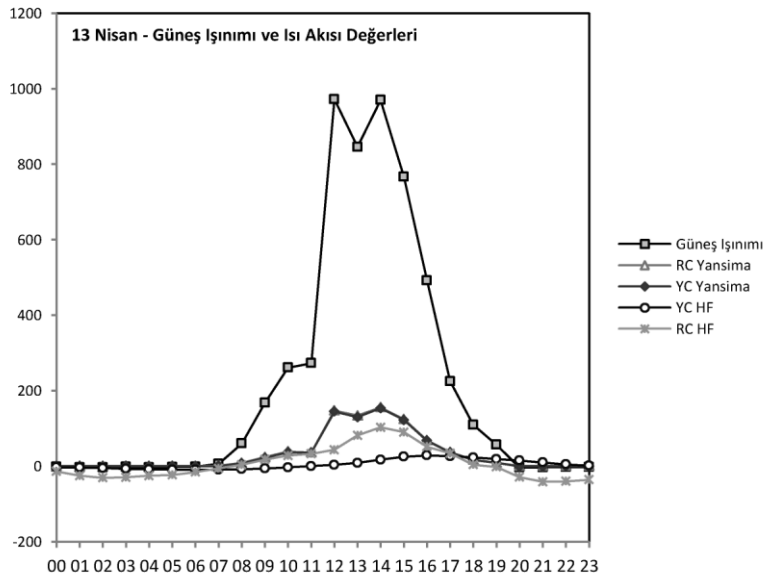
Çalışma sırasında günlük ortalama hava sıcaklığının en düşük değere sahip olduğu gün olan 10 Mart 2011 tarihinde, gün içerisindeki en düşük sıcaklık sabah saat 07.00'de $0,5^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Aynı saatte referans çatının yüzey sıcaklığı $-4,0^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşmüştür. En 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 etmemiştir. 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 4.20).



Şekil 4.20: En soğuk gün içerisinde çatı katmanlarının sıcaklık dağılımları

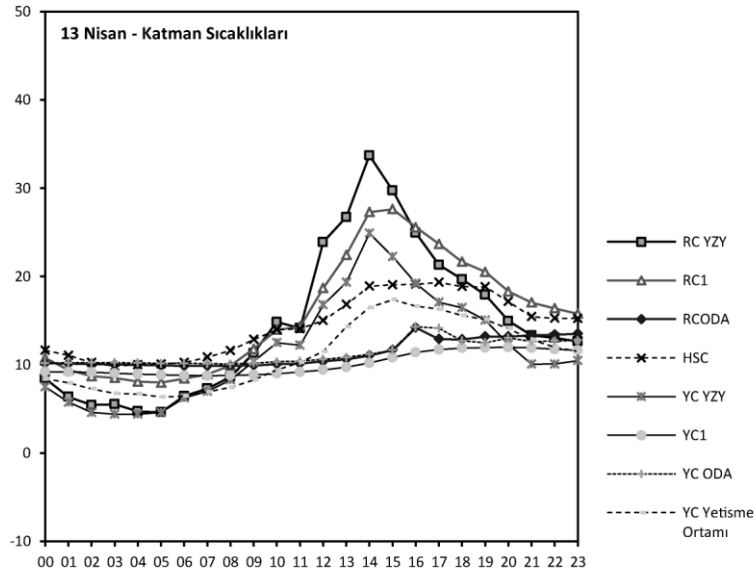
Çatı üzerinde oluşan sıcaklık, ısı ve yansıma etkilerini detaylı inceleyebilmek için, gün içerisinde oluşan değişimler incelenmiştir. Ölçüm dönemi içerisinde, güneşli bir günde oluşan etkiler Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21: 13 Nisan 2011’de gün içerisindeki güneş ışınımı ve ısı akısı değerleri

Şekil 4.21’de çatı yüzeyine gelen güneş ışınlamı, her iki çatıda oluşan yansıma miktarı ve çatı sistemlerinde oluşan ısı akısı miktarı görülmektedir. Beklendiği üzere saat 12.00 – 15.00 saatleri arasında güneş ışınlamı en yüksek değere ulaşmıştır. Gelen ışınlam miktarının, her iki çatı sistemindeki yansıma oranında ise belirgin fark oluşmamıştır. Çatı yüzeylerinde oluşan ısı akısı incelendiğinde, referans çatıdaki ısı akısının güneş ışınlamına paralel bir seyir izlediği görülmektedir. Güneşin doğrudan geldiği saatlerde, referans çatıdan yapıya doğru oluşan ısı akısı miktarı artmakta ancak gece saatlerinde bu durum terse dönmekte ve yapıya geçiş yapan ısı miktarı aynı şekilde kaybedilmektedir. Güneş ışınlamının arttığı saatlerde, yeşil çatı sisteminden yapıya doğru oluşan ısı akısında küçük bir artış görülmekte, güneşin battığı saatlerde ise ısı akısı sıfırlanmaktadır. Referans çatıdan farklı olarak, yeşil çatıdan yapıya doğru geçen ısı akısı miktarı daha azdır ve yapıdan herhangi bir ısı kaybı söz konusu değildir.

Aynı gün içerisinde çatı katmanlarının sıcaklıkları incelendiğinde, hava sıcaklığının en yüksek değere ulaştığı saat olan 14.00’te, hava sıcaklığı 11,8°C ölçülürken, en sıcak değere oluşan katman 33,7°C ile referans çatının yüzey sıcaklığı olmuştur. Aynı saatte yeşil çatının yüzey sıcaklığı ise 24,9°C olarak ölçülmüştür (Şekil 4.22).

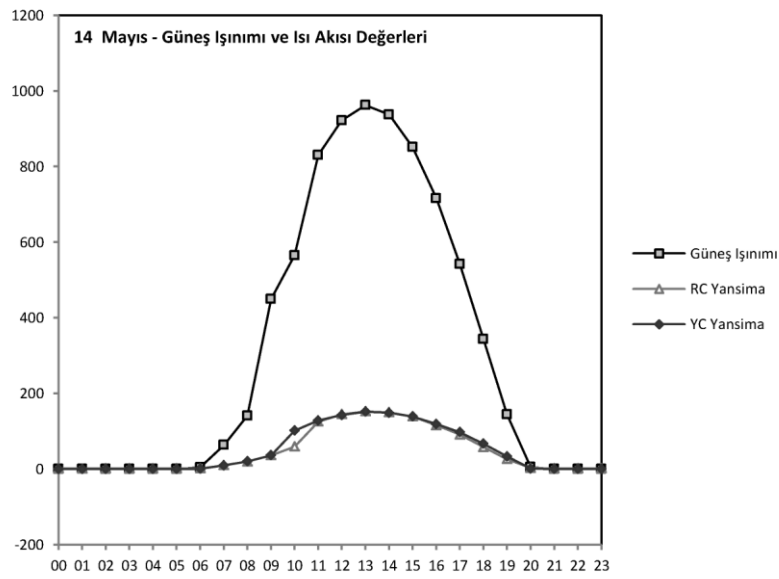


Şekil 4.22: 13 Nisan 2011’de gün içerisindeki sıcaklık değerleri

13 Nisan 2011 tarihinde, gün içerisindeki en düşük sıcaklık yeşil çatının yüzeyinden ölçülmüştür. Saat 03.00 ve 04.00’te yeşil çatının yüzey sıcaklığı 4,4°C olarak ölçülürken, referans çatının yüzey sıcaklığı ortalama 5,1°C olarak ölçülmüştür. Şekil

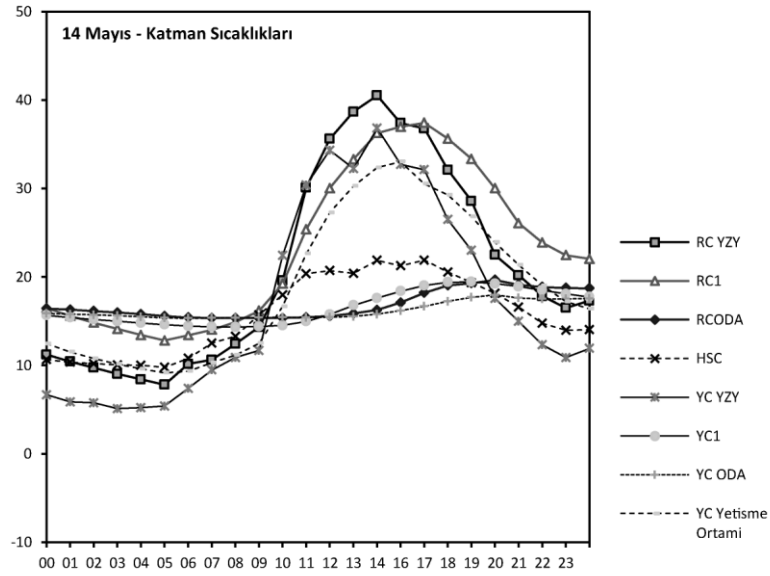
4.31’de görüldüğü üzere, referans çatının yüzey sıcaklığı ile en alt katman sıcaklığı çok yakın değerlerde seyretmiş, yeşil çatının yüzey sıcaklığındaki değişimler ise en alt katmandaki sıcaklığa önemli bir etkiye bulunmamıştır. Yeşil çatı sisteminin, altında bulunan katmanları ve yapıyı çevresinde bulunan sıcaklık etkilerinden belirgin bir şekilde koruduğu görülmektedir.

Günlük ortalama güneş ışıınımı değerinin en yüksek olduğu gün olan 14 Mayıs 2011 tarihinde, yapılan ölçümler ve çatı katmanlarındaki değişimler Şekil 4.23 ve 4.24’te gösterilmiştir.



Şekil 4.23: 14 Mayıs 2011’de gün içerisindeki yansıma değerleri

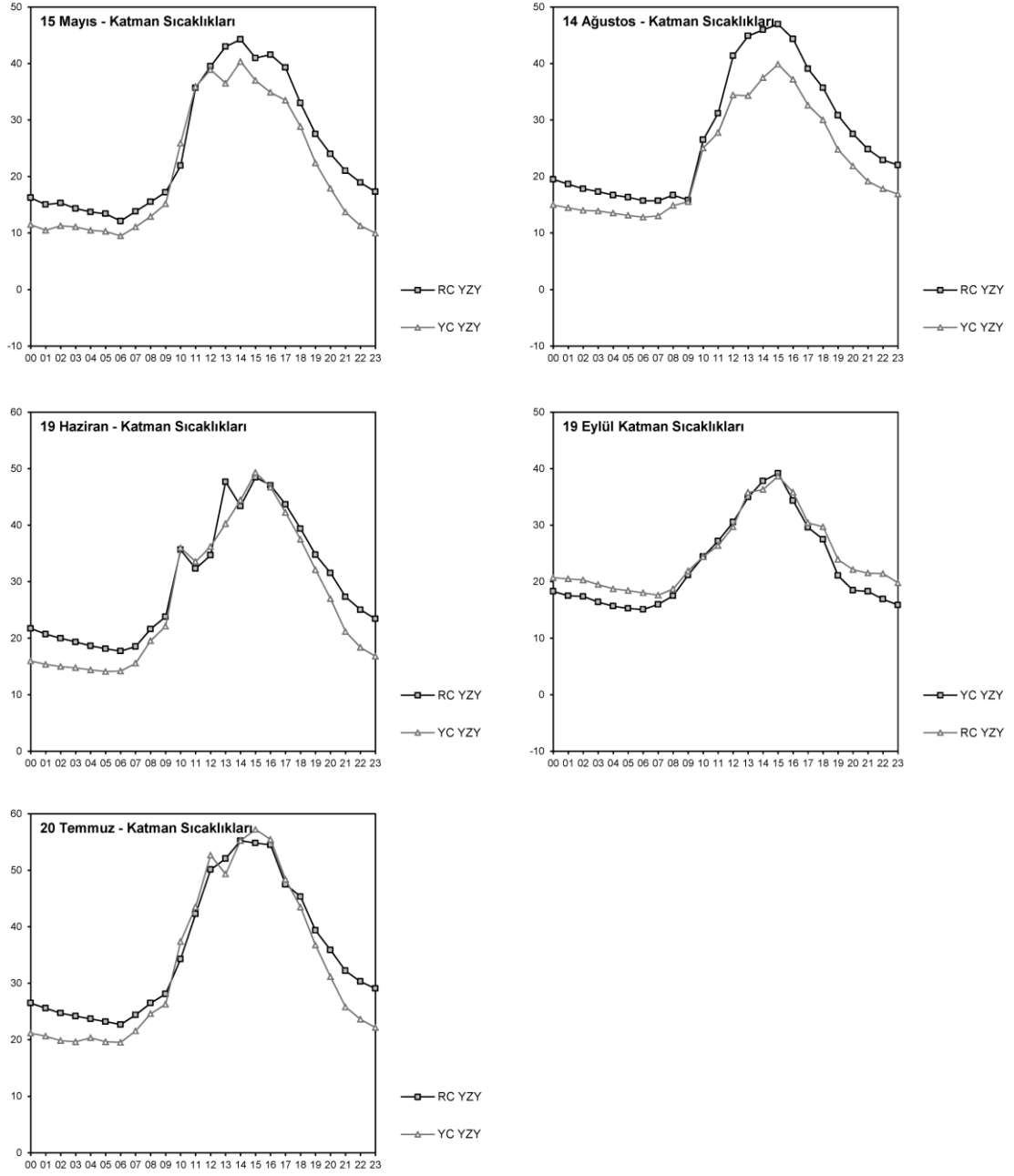
Güneş ışıınımının en yüksek değere ulaştığı 14 Mayıs 2011 tarihinde, her iki çatıdan yansıyan enerji miktarının yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Ancak yüzey özelliği nedeniyle referans çatının yansıtıcılık değeri daha yüksektir.



Şekil 4.24: 14 Mayıs 2011’de gün içerisindeki sıcaklık değerleri

Aynı gün içerisinde çatı sistemlerinin katman sıcaklıkları incelendiğinde, hava sıcaklığı 12°C olarak ölçülürken, en sıcak katman referans çatının yüzey sıcaklığı olarak ölçülmüştür. Bu katman günün en sıcak saati olan 14.00’te 40°C sıcaklığa ulaşmıştır. Aynı saatte ölçülen en düşük sıcaklık ise, 15°C ile yeşil çatının en alt katmanından elde edilmiştir.

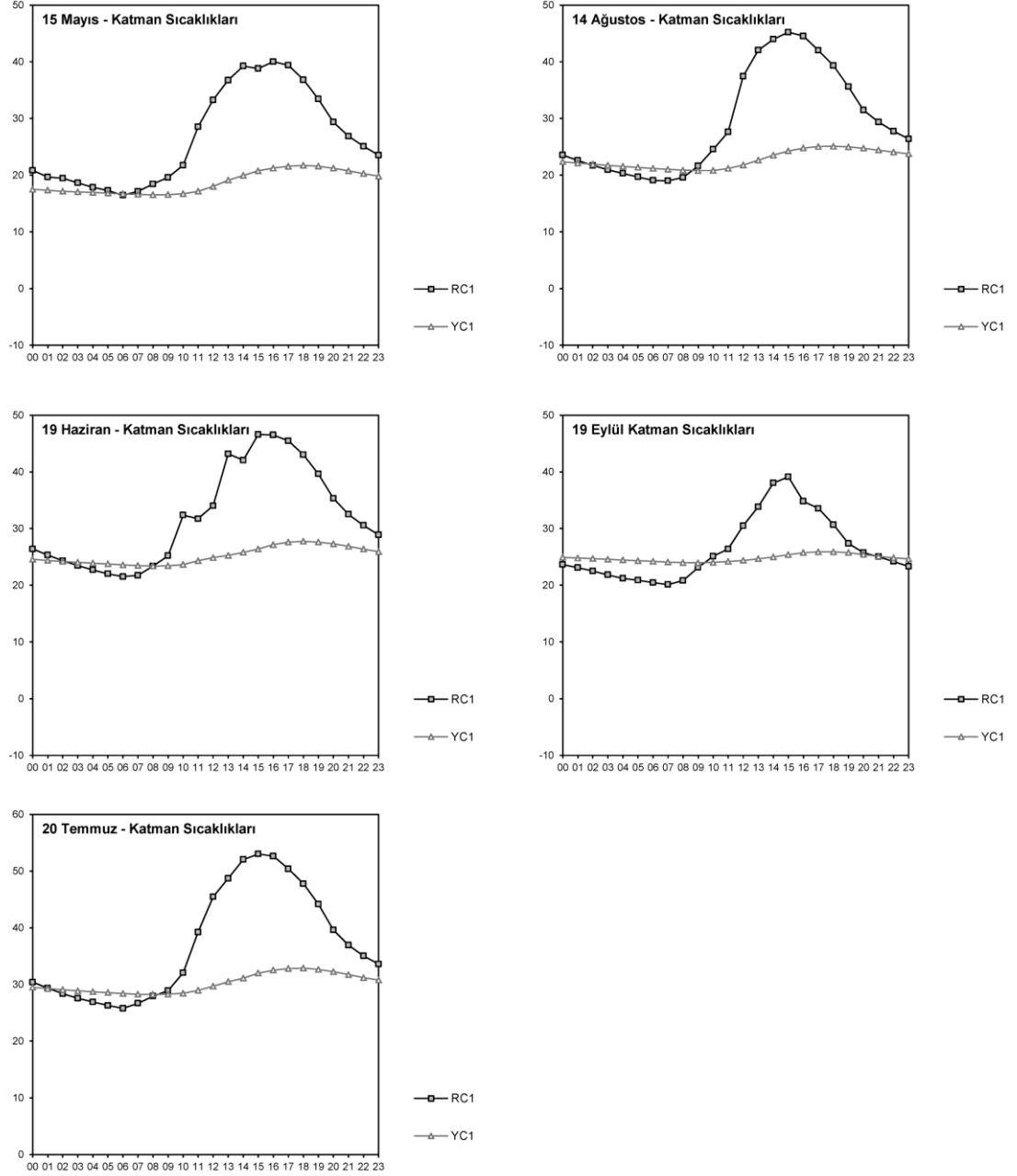
Çalışma döneminde, çatı sistemlerinin yüzey ve çatı levhası sıcaklıkları hava sıcaklığının arttığı dönem içerisinde rastgele belirlenen günlerde analiz edilmiştir. Çatı sistemlerinin yüzeyinde oluşan gün içerisindeki saatlik sıcaklık dağılımları Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Gün içerisindeki dağılımlar, günlük ortalamalara benzer biçimde bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4.25: Ölçüm dönemi içerisinde rastgele seçilen günlerde oluşan çatı yüzey sıcaklıkları

Seçilen günlerdeki çatı yüzey sıcaklıklarının dağılımı incelendiğinde yeşil çatının hava sıcaklığında oluşan değişimlere daha geç tepki vermiş olduğu görülmektedir. Güneş ışınımının en yüksek noktaya ulaştığı 12-14 saatlerinde çatı yüzey sıcaklıkları birbirine yakın değerlere ulaşmıştır.

Yağışlı dönemlerin olduğu Mayıs ve Ağustos aylarından seçilen günlerde, evaporasyonun etkisiyle yeşil çatının yüzey sıcaklığı daha düşük değerlere sahiptir. Belirlenen günlerde çatı yüzeylerinde oluşan sıcaklığın yapıya olan etkileri de araştırılmıştır(Şekil 4.26).



Şekil 4.26: Ölçüm dönemi içerisinde rastgele seçilen günlerde oluşan çatı levhası sıcaklıkları

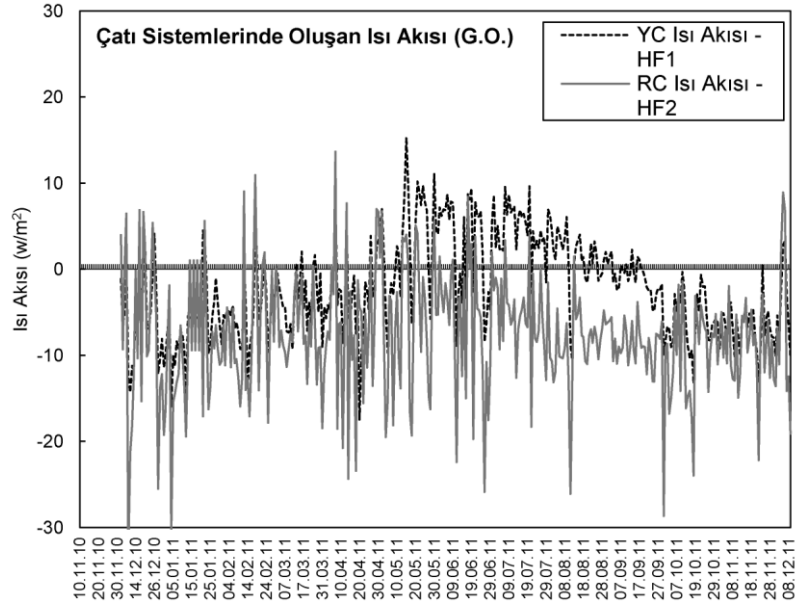
Çatı yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimleri referans çatının altında bulunan yapı kabuğuna doğrudan aktarılırken, yeşil çatı sistemi bu değişimi belirgin bir oranda azaltmıştır.

Tez çalışmasında, yeşil çatının altındaki çatı levhasının sıcaklığı 382 günlük ölçüm döneminin 130 gününde 10°C'nin altında, 119 gününde 10 – 20°C arasında, 130 gününde 20-30°C arasında ve 3 gününde 30°C'nin üzerinde ölçülmüştür. Referans çatının altındaki çatı levhasının sıcaklığı ise 382 günün 131 gününde 10°C'nin altında, 107 gününde 10 – 20°C arasında, 88 gününde 20-30°C arasında ve 56 gününde 30°C'nin üzerinde ölçülmüştür. Referans çatının yüzey sıcaklığı, 382 günün 161 günü 10°C'nin altında, 87 günü 10-20°C arasında, 106 günü 20-30°C arasında, 28 günü ise 30°C'nin üzerinde kaydedilmiştir. Yeşil çatının yüzey sıcaklığı çalışma döneminin 182 günü 10°C'nin altında, 82 günü 10-20°C arası, 111 günü 20-30°C arasında ve 7 günü 30°C'nin üzerinde tespit edilmiştir (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Çatı sistemlerinin yüzey ve çatı levhası sıcaklıklarının belirlenen sıcaklık aralıklarına göre dağılımı

ÇATI LEVHASI	GÜN SAYISI	YÜZDE	ÇATI YÜZEYİ	GÜN SAYISI	YÜZDE
YC1<10	130	34,03%	YCYZY<10	182	47,64%
10<YC1<20	119	31,15%	10<YCYZY<20	82	21,47%
20<YC1<30	130	34,03%	20<YCYZY<30	111	29,06%
YC1>30	3	0,79%	YCYZY>30	7	1,83%
TOPLAM	382	100,00%	TOPLAM	382	100,00%
RC1<10	131	34,29%	RCYZY<10	161	42,15%
10<RC1<20	107	28,01%	10<RCYZY<20	87	22,77%
20<RC1<30	88	23,04%	20<RCYZY<30	106	27,75%
RC1>30	56	14,66%	RCYZY>30	28	7,33%
TOPLAM	382	100,00%	TOPLAM	382	100,00%

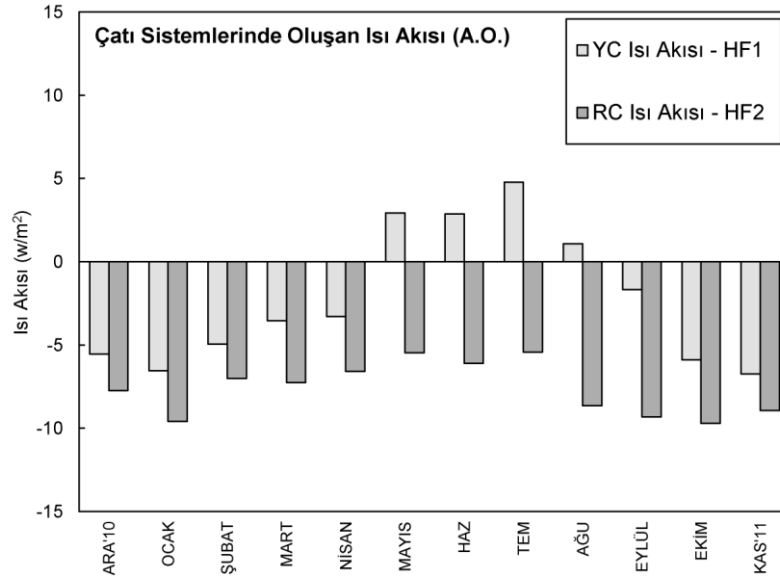
Bu çalışma sırasında, her iki çatı sisteminin ısı yalıtım özelliklerini incelemek amacıyla, bu alanlarda oluşan ısı akısı (heat flux) miktarı ölçülmüştür. Her iki çatı sisteminde oluşan günlük ortalama ısı akısı Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27: Her iki çatı sisteminde oluşan günlük ortalama ısı akısı miktarı

Grafikteki “-” değerler çatılardan kaybedilen ısı miktarını, “+” değerler ise yapıya çatı yüzeyinden giriş yapan ısı miktarını göstermektedir. Grafikte görüldüğü üzere, yeşil çatı ile kaplı çatı yüzeyinde oluşan ısı transferi miktarı, referans çatı sistemine göre daha azdır. Yeşil çatı ile kaplı bölümden ölçümler boyunca toplam ortalama $645,3 \text{ w/m}^2$ ısı kaybı olmuştur. Referans çatıda oluşan toplam ortalama ısı kaybı ise $1147,5 \text{ w/m}^2$ olarak ölçülmüştür.

Her iki çatı sistemi ısı verimliliği açısından değerlendirildiğinde, yeşil çatı sisteminin referans çatıya oranla genel ortalama $\%77$ oranında ısı verimliliği sağladığı tespit edilmiştir. Ancak yaz aylarında yeşil çatı sisteminde nem varlığının azalması, ısı yalıtım özelliğini de azaltmıştır. Her iki çatı sisteminde oluşan aylık ısı akısı miktarları Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

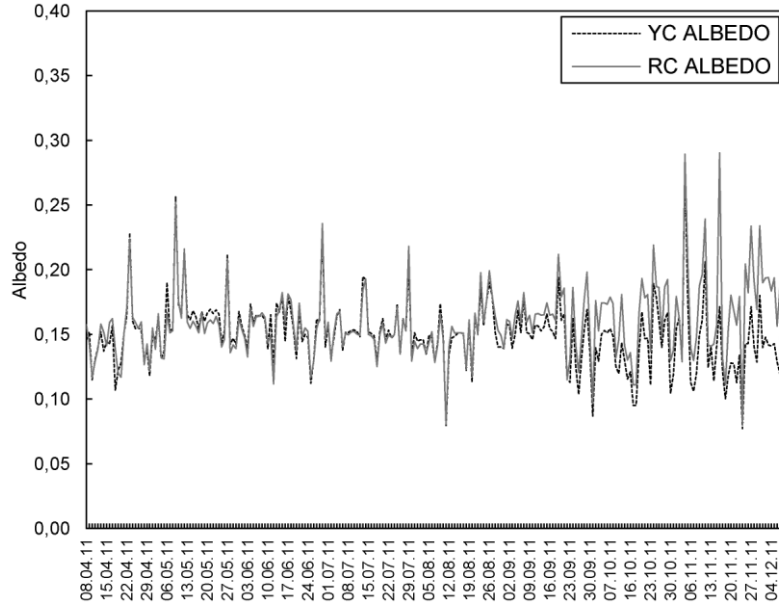


Şekil 4.28: Her iki çatı sisteminde oluşan aylık ortalama ısı akısı miktarı

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.

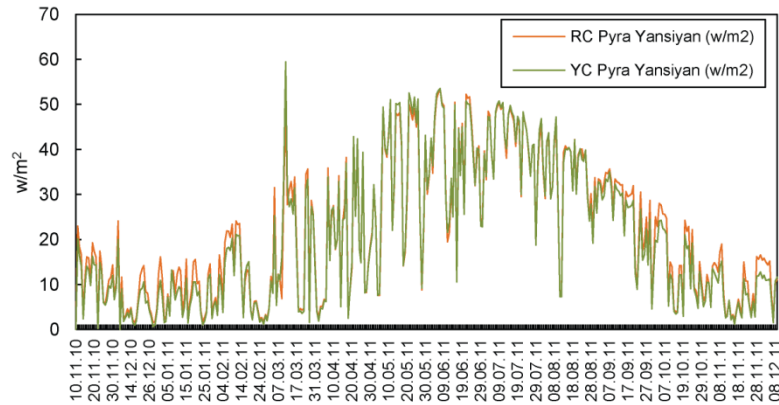
4.2.2 Çatı Sistemlerinin Yansıtıcılık (Albedo) Değerleri

Deneme alanındaki çatı sistemlerinin yansıtıcılık özellikleri, kentlerde oluşan kentsel ısı adası etkisi açısından önem taşımaktadır. Yansıtıcılık özelliği yüksek olan yüzeyler daha az ısınmakta ve kentsel ortamlardaki sıcaklık değerlerini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Nisan- Kasım ayları arasında çatı sistemlerinin günlük ortalama yansıtıcılık (albedo) değerleri Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29: Çatı yüzeylerinin günlük ortalama yansıtıcılık değerleri

Her iki çatı sisteminin yansıtıcılık özellikleri benzer karaktere sahiptir. Yeşil çatı sistemi renk ve doku olarak belirgin bir yansıtıcılığa sahip olmasa da, çatı yüzeyine gelen güneş enerjisini soğurma yetisine sahiptir. Yeşil çatı sisteminin yüzeyde oluşan sıcaklığı absorbe etme özelliği önceki bölümlerde de incelenmiştir. 2011 yılının Ekim ve Kasım aylarında referans çatının yansıtıcılık değeri yeşil çatı sisteminden daha yüksek olarak tespit edilmiştir.

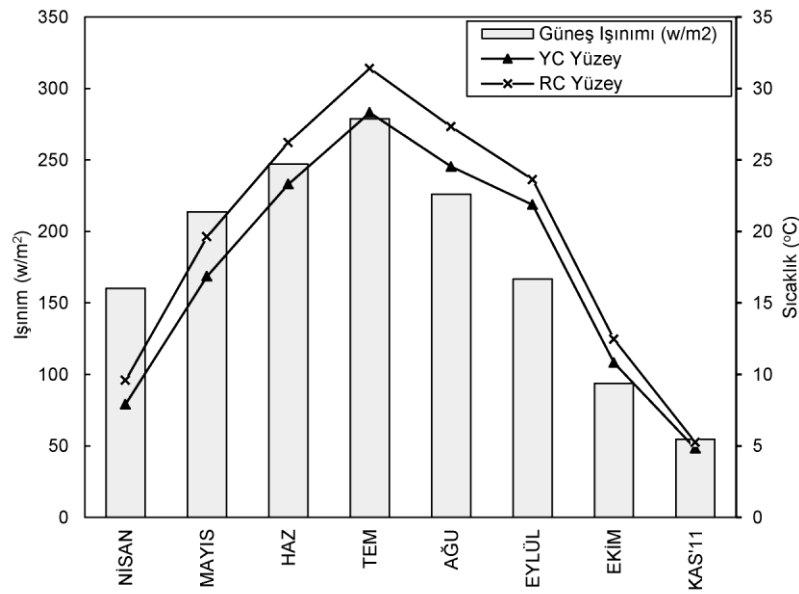


Şekil 4.30: Çatı yüzeylerinden yansıyan günlük ortalama enerji miktarı

Çatı yüzeylerinden yansıyan enerji miktarı incelendiğinde(Şekil 4.30), yansıtıcılık değerlerinde olduğu gibi, güneş ışınımının azaldığı aylar haricinde yansıyan enerji miktarının yakın değerlerde seyrettiği görülmüştür. Kış ve sonbahar aylarında referans çatıdan yansıyan enerji miktarı daha yüksektir. Yansıyan enerji miktarının fazla olduğu günlerde, çatı yüzeyinden yapıya transfer olan ısı miktarı artmış, yansıyan enerji miktarı

azaldığında ise, yapıdan kaybolan ısı miktarı azalmıştır. Yansımaya değerleri yakın olmasına rağmen, referans çatıda oluşan ısı akısı, yeşil çatı yüzeyine göre daha büyük değerlere ulaşmıştır. Genel bir değerlendirme yapıldığında, çatı yüzeyine gelen güneş enerjisini, yeşil çatının referans çatıya göre %7 daha az yansıttığı ortaya çıkmaktadır

Çatı yüzeyine gelen güneş ışınımının yüzey sıcaklıklarına olan etkisi Şekil 4.28’de değerlendirilmiştir. Ölçüm dönemi boyunca çatı yüzey sıcaklıkları güneş ışınımı ile doğru orantılı bir dağılım göstermiştir. Yeşil çatı sistemi güneş ışınımından daha az etkilenmiş ve yüzey sıcaklığı referans çatıya göre daha düşük olmuştur.



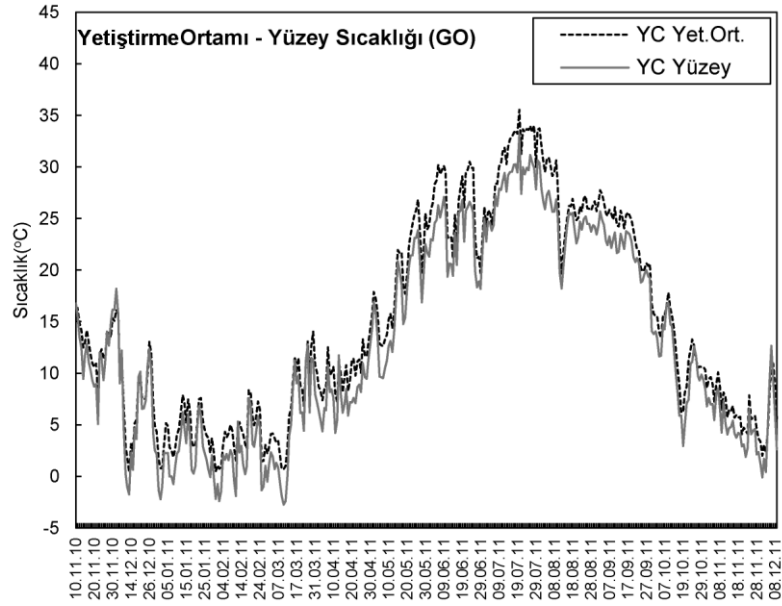
Şekil 4.31: Çatı yüzeylerine gelen güneş ışınımı ile yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

4.2.3 Yetiştirme Ortamından Elde Edilen Sıcaklık ve Nem Değerleri

Çatı yüzeyleri, yer seviyesindeki bir yapısal yüzeye oranla çevresel etkilerden daha çok etkilenmektedir. Bunun en önemli nedeni yükseklik faktörüdür. Bunun yanı sıra, sınırlı bir yetiştirme ortamı, şiddetli rüzgar etkileri, sistemin yapı üzerinde bulunması ve bu etkenlerin oluşturduğu değişken sıcaklıklar çatı sistemini ve üzerinde bulunan bitkileri etkilemektedir. Yeşil çatı sisteminde oluşan sıcaklık değişimleri, yağış ve güneşlenme gibi faktörler, yetiştirme ortamında bulunan bitkileri de aynı oranda etkilemektedir.

Ölçüm döneminde günlük ve aylık olarak yetiştirme ortamının nem miktarı, ardışık yağışsız günlerdeki nem miktarının değişimi ve çevresel faktörlerle olan ilişkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yeşil çatı sisteminin yüzeyinde oluşan sıcaklığın yetiştirme ortamına olan yansıması, bitkilerin yetiştiği bu ortamdaki koşulların belirlenmesi ve bu durumun bitki gelişimine olan etkisinin gözlenmesi için önemli bir göstergedir. Yetiştirme ortamından elde edilen sıcaklık ölçümleri, yüzeyin 2-3 cm. altında bulunan sıcaklık vericisiyle gerçekleştirilmektedir. Yeşil çatının yetiştirme ortamı ile yüzey sıcaklığının günlük sıcaklık ortalamaları Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



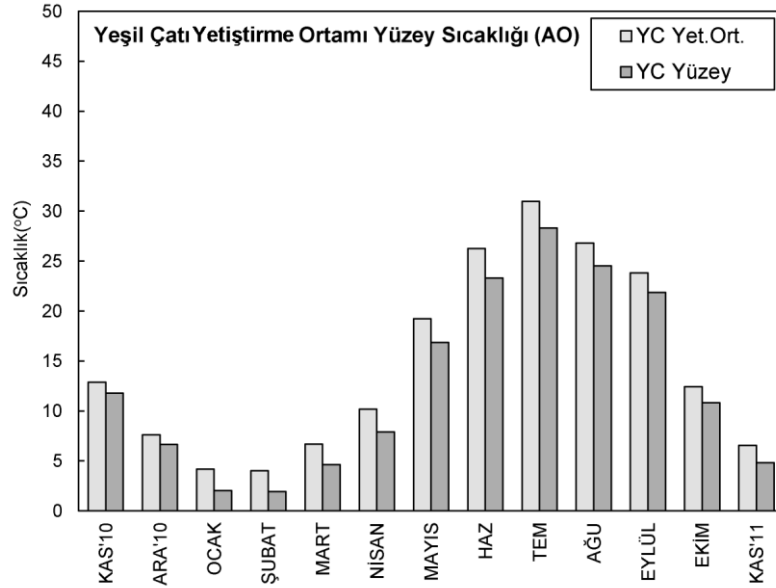
Şekil 4.32: Günlük ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerleri

Hava sıcaklığının 0°C 'ye yaklaştığı kış aylarında yetiştirme ortamının sıcaklığı ile hava sıcaklığı değerleri birbirlerine çok yakındır. Yüzey sıcaklığı ise 0°C 'nin altına düşmüştür.

Yetiştirme ortamının sıcaklığı, soğuk aylarda yeşil çatının yüzey sıcaklığına göre daha yüksek değerlere sahiptir. Kış aylarında, gerek bitkilerin gerekse yetiştirme ortamının yalıtım etkisi gözle görünür bir fark oluşturmaktadır.

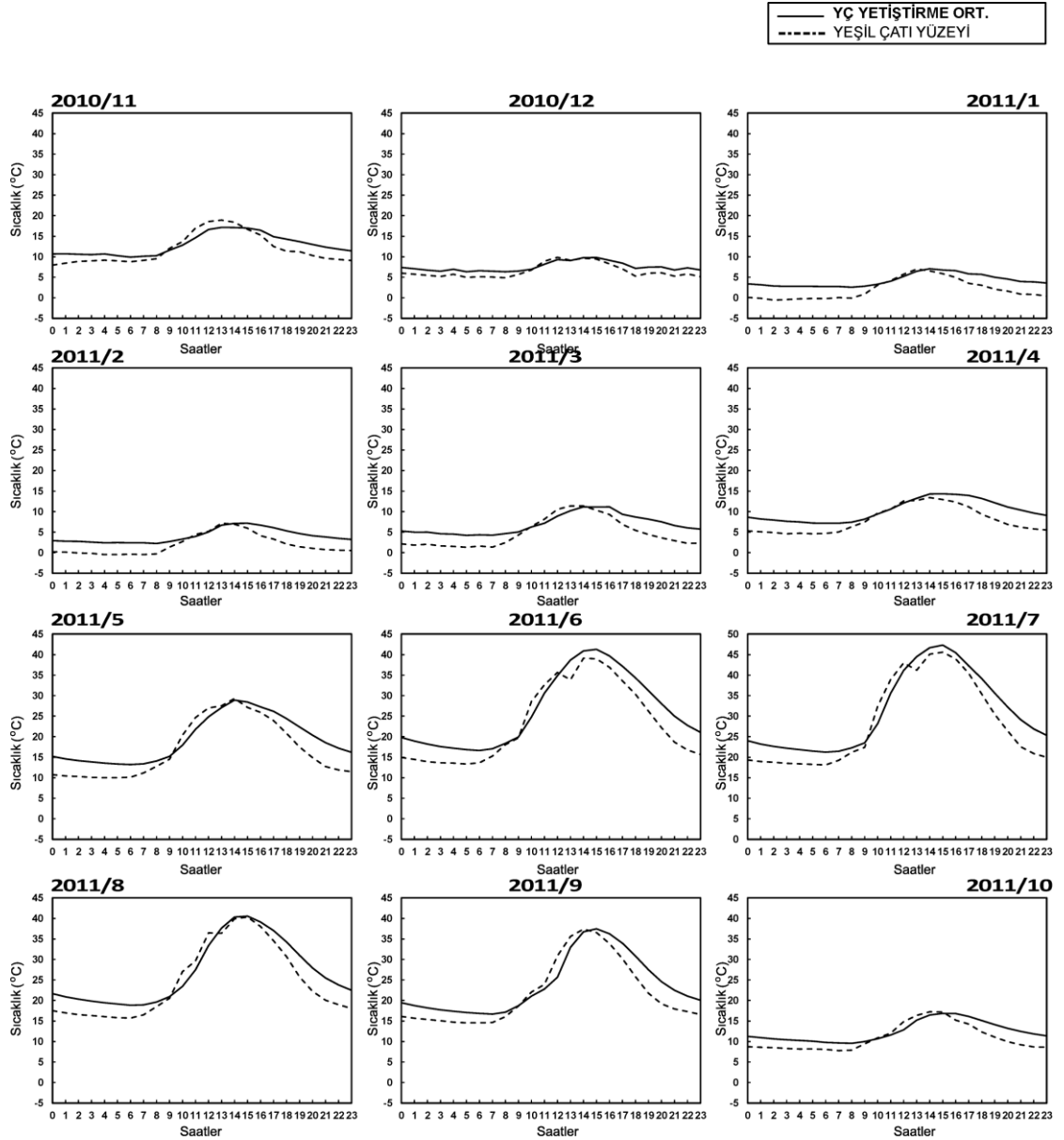
Yaz aylarında ise, yetiştirme ortamındaki nem değerinin de azalmasıyla yetiştirme ortamı yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Ölçüm döneminin en sıcak gününde yetiştirme ortamının sıcaklığı referans çatının yüzey sıcaklığıyla aynı değere yükselerek $35,5^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür.

Aylık ortalamalar incelendiğinde, soğuk geçen kış aylarında, yetiştirme ortamının sıcaklığının hava sıcaklığıyla paralel bir dağılım gösterdiği, ancak yüzey sıcaklığının oldukça düşük değerlere ulaştığını söylemek mümkündür. Hava sıcaklığındaki artışla birlikte, yetiştirme ortamı, yeşil çatının yüzeyine göre 1–4°C daha sıcak olmaktadır(Şekil 4.33).



Şekil 4.33: Aylık ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılması

Mevsimsel olarak yapılan değerlendirmede, yetiştirme ortamı sıcaklığının yeşil çatının yüzey sıcaklığından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir(Şekil 4.31). Bitkilerle kaplı olan yeşil çatının yüzeyi düşük sıcaklık değerlerine sahipken, yetiştirme ortamı dış ortamdan daha belirgin bir oranda etkilenmiştir. Bitkilerle kaplı olmayan boş yüzeyler ve yetiştirme ortamındaki nem varlığının etkisiyle belirgin sıcaklık değişimleri görülmüştür. Aynı zamanda bitkilerin çatıyı kaplama oranı da sıcaklık değişimindeki en büyük etkenlerdir. Yeşil çatının yetiştirme ortamının aylara göre günlük döngü grafikleri Şekil 4.34'de gösterilmiştir.

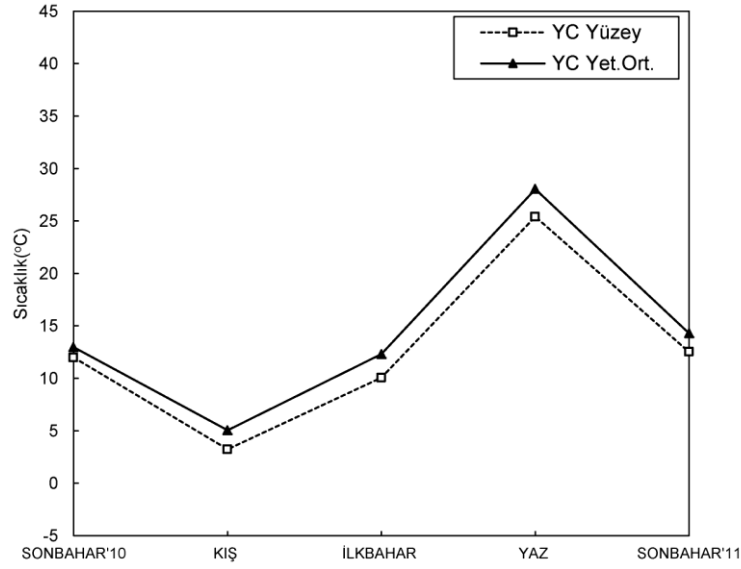


Şekil 4.34: Yeşil çatı yetiştirme ortamı sıcaklığının günlük döngü (diurnal cycle) grafikleri

Yeşil çatının yüzeyi ile yetiştirme ortamının sıcaklıkları incelendiğinde, yeşil çatının yüzeyindeki ısınma-soğuma döngüsü, yetiştirme ortamına oranla daha hızlı gerçekleşmiştir. Yetiştirme ortamı, kış aylarında yüzey sıcaklığına oranla daha durağan sıcaklık değerlerine sahiptir.

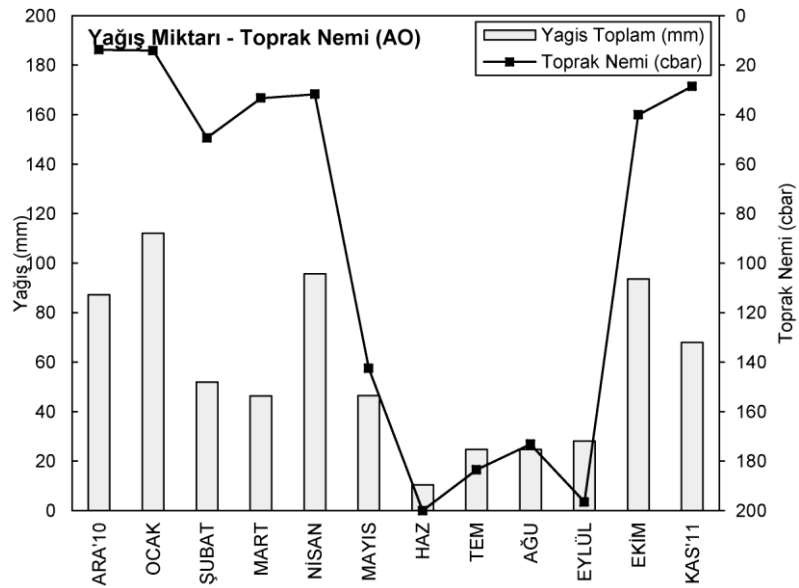
Yaz aylarında yetiştirme ortamından elde edilen sıcaklık değerleri, nem içeriğinin de azalmasıyla birlikte yeşil çatının yüzey sıcaklığından daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Yetiştirme ortamındaki sıcaklık dalgalanmaları (ay içerisindeki min-maks. değerler farkı) 3,5 – 26,1°C arasında kaydedilmiştir. Yeşil çatı sisteminin yüzeyinde oluşan

sıcaklık değişimi ise 5,0–27,4°C’dir. Ölçüm döneminde yeşil çatının yüzey sıcaklığı yetiştirme ortamından daha düşüktür.(Şekil 4.35)

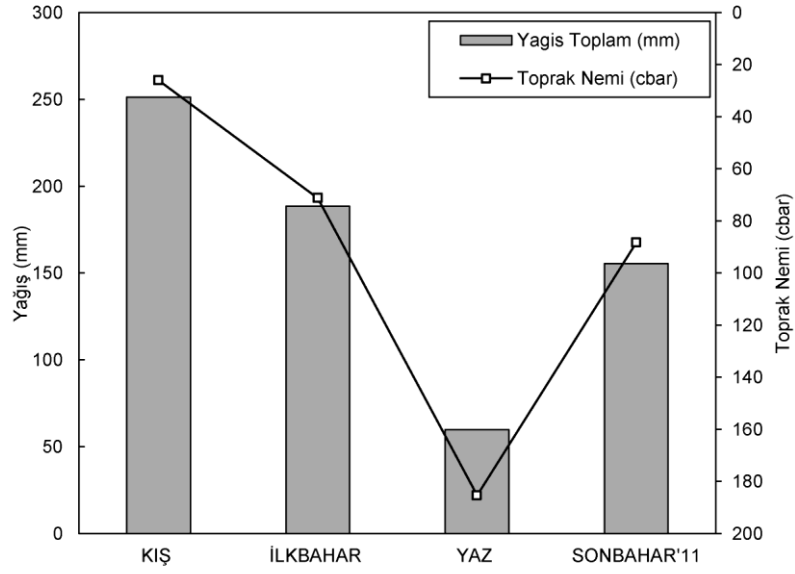


Şekil 4.35:Aylık ortalama yeşil çatı yüzey sıcaklığı - yetiştirme ortamı sıcaklığı değerlerinin mevsimlere göre değişimi

Yetiştirme ortamındaki nem değerinde oluşan aylık değişimleri incelemek amacıyla, yağış miktarı ile nem değeri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.36). Yağış miktarının fazla olduğu aylarda toprak neminin arttığı, yağış miktarının azaldığı aylarda ise toprak neminin azaldığı görülmüştür. Yaz mevsiminde, yetiştirme ortamındaki nem miktarı belirgin bir düşüş göstermiş, kış mevsiminde ise en yüksek değerine ulaşmıştır (Şekil 4.37).



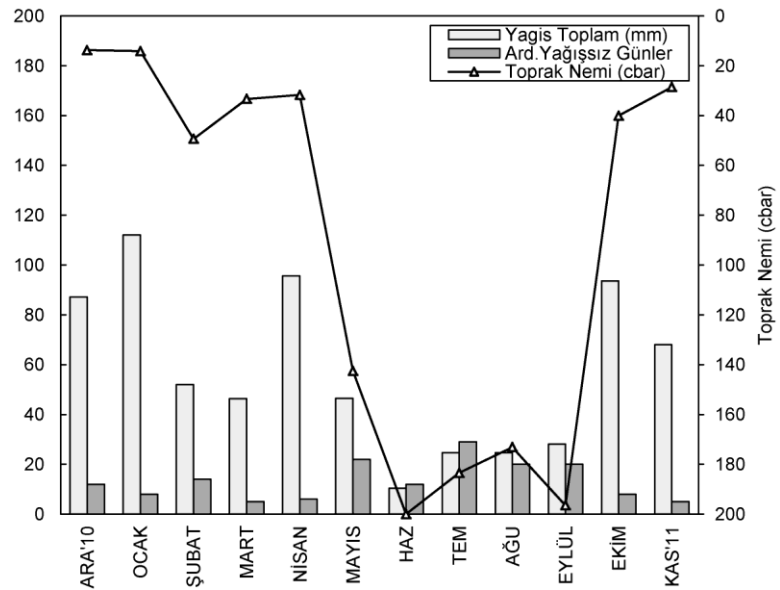
Şekil 4.36: Aylık toplam yağış – ortalama yetiştirme ortamı nemi



Şekil 4.37: Mevsimlere göre toplam yağış – ortalama yetiştirme ortamı nemi

Şubat ve Mart aylarında benzer yağış miktarı ve hava sıcaklığı değerlerine rağmen, yetiştirme ortamının nem değerindeki bazı farklılıklar tespit edilmiştir.

Özellikle 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 (Şekil 4.38).



Şekil 4.38: Aylık ortalama yetiştirme ortamı nem değerleri – çevresel etmenler

Yetiştirme ortamında kaydedilen ne düşük nem miktarı Mayıs ayında ölçülürken, en yüksek nem değeri Aralık ve Ocak aylarında ölçülmüştür. Aralık ve Ocak aylarında, bağıl nem ve yağış miktarı yüksektir. Ardışık yağışsız gün sayısı az, hava sıcaklığı ise düşüktür. Mayıs ayında ise bu değerler aksi yönde dağılım göstermiştir.

Yetiştirme ortamındaki nem değeri, ardışık yağışsız günlerde belirgin düşüşler göstermektedir. Bitkiler, alt katmanlardan buharlaşan suyu belli oranda kullanabilseler de, oluşan buharlaşma toprak nemine yansımamakta ve yeşil çatı sisteminin su biriktiren katmanlarındaki su varlığı, yapılan ölçümler sırasında belirlenmemektedir.

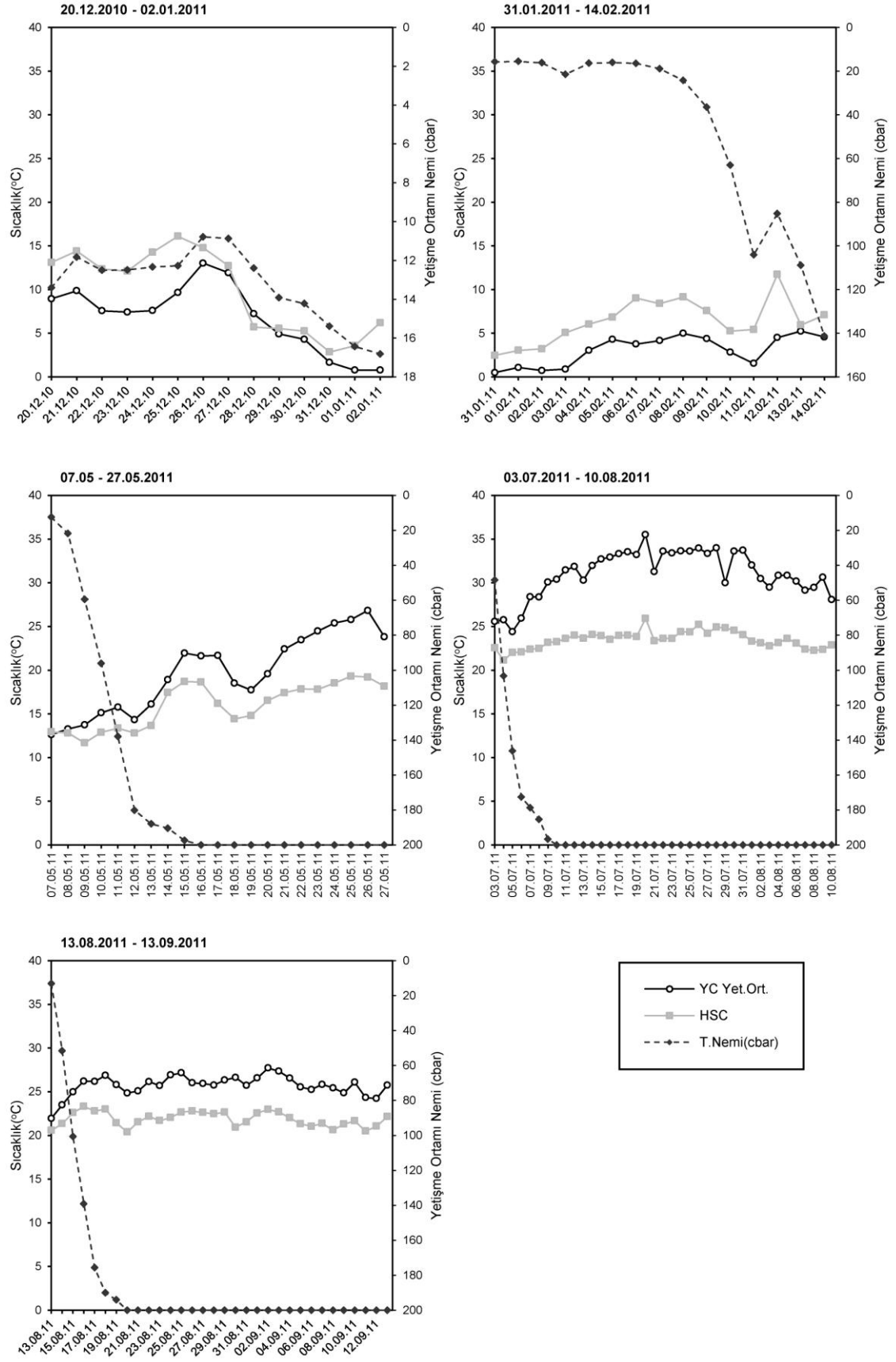
Çalışma sırasında, en uzun yağışsız dönem 40 günle 12 Ağustos 2011 – 20 Eylül 2011 tarihleri arasında tespit edilmiştir. İkinci en uzun yağışsız dönem ise 3 Temmuz – 10 Ağustos tarihleri arasındaki 33 günlük yağışsız dönemdir(Tablo 4.4).

Tablo 4.4: Aylara göre toplam yağış, ortalama yetiştirme ortamı nemi, ardışık yağışsız günler

AYLAR	Yağış Toplam (mm)	Toprak Nemi (cbar)	Ardışık Yağışsız Günler
ARA'10	87,2	13,8	12
OCAK	112,1	14,1	8
ŞUBAT	52,0	49,4	14
MART	46,3	33,4	5
NİSAN	95,7	31,7	6
MAYIS	46,5	142,5	22
HAZ	14,2	200,0	12
TEM	24,7	183,5	29
AĞU	24,7	173,1	20
EYLÜL	28,1	196,5	20
EKİM	93,6	40,1	8
KAS'11	68,0	28,6	5

Yeşil çatı sistemi ilk 32 günlük yağışsız dönem ile ikinci 40 günlük yağışsız dönem arasında oluşan 24 mm/m^2 yağışın 20 mm/m^2 'sini bünyesinde tutmuştur. Ancak hava sıcaklığının etkisiyle yetiştirme ortamındaki su içeriği, yağışsız dönemin 7. gününde 200 cbar'ın üzerine çıkmıştır. Grafikte, ardışık maksimum yağışsız günlerde yeşil çatı sisteminin yetiştirme ortamından elde edilen nem değerleri gösterilmiştir(Şekil 4.39).

Ardışık Yağışsız Günler



Şekil 4.39: Yetiştirme ortamında en uzun ardışık yağışsız günlerde oluşan nem değerleri

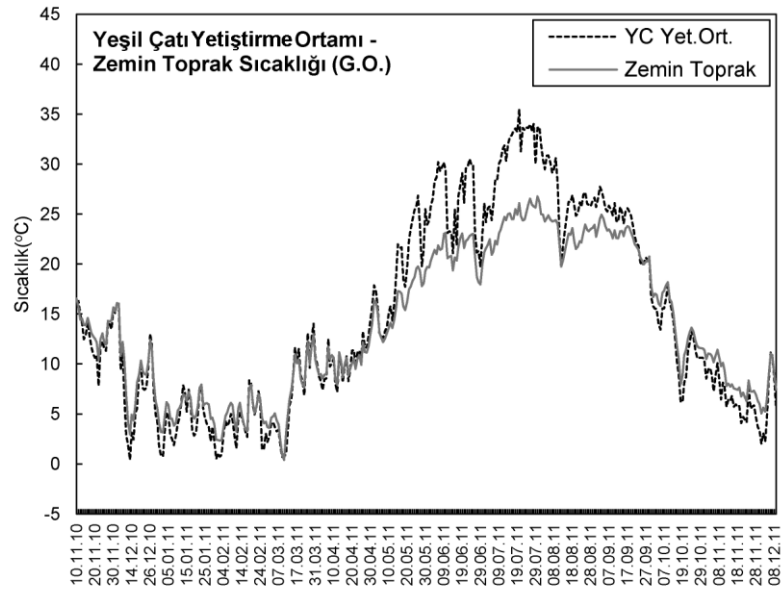
Kış aylarında iki önemli kurak dönem tespit edilmiştir. 20.12.2010 – 02.01.2011 tarihleri arasında oluşan 14 günlük ardışık yağışsız günlerde, hava sıcaklığının kurak dönem boyunca düşüş göstermesi nedeniyle yetiştirme ortamından oluşan buharlaşma düşük seviyede kalmış ve yetiştirme ortamındaki nem miktarında belirgin bir azalma tespit edilmemiştir. 31.01.2011 – 14.02.2011 tarihleri arasındaki 15 günlük kurak dönemde ise, hava sıcaklığı yükselme eğilimi göstermiş ve yetiştirme ortamındaki nem değeri 160 cbar'a kadar gerilemiştir.

İklimsel özellikler nedeniyle, bahar ve yaz aylarındaki kurak dönemler yeşil çatı sistemi üzerinde daha belirgin etkilerin oluşmasına neden olmuştur. 07.05.2011-27.05.2011 tarihleri arasındaki 20 günlük kurak dönemde, hava sıcaklığının da etkisiyle yeşil çatının yetiştirme ortamında görülen su kaybı daha hızlı gerçekleşmiştir. Kurak dönemin ilk 9 gününde yetiştirme ortamındaki nem miktarı 10 cbar'dan 200 cbar'a kadar düşmüştür. Yetiştirme ortamının sıcaklığı da hava sıcaklığındaki artıştan etkilenmiş ve kurak dönemin sonunda 30°C'ye kadar yükselmiştir.

Yaz aylarında tespit edilen ilk önemli kurak dönem 03.07.2011-10.08.2011 tarihleri arasında gerçekleşen 33 günlük kurak dönemdir. Bu dönemde yetiştirme ortamından hızlı bir buharlaşma gerçekleşmiş ve yetiştirme ortamı 7 gün içerisinde nem içeriğini kaybetmiştir. Dönemin başlangıcında nem içeriği 50 cbar olarak kaydedilen yetiştirme ortamının, düşük nem içeriği nedeniyle su kaybı hızlı olmuştur. Dolayısıyla, kurak dönem içerisinde yetiştirme ortamı ile hava sıcaklığının arasındaki farklar 10°C'ye kadar yükselmiş ve yetiştirme ortamının sıcaklığı 30-37°C aralığında ölçülmüştür.

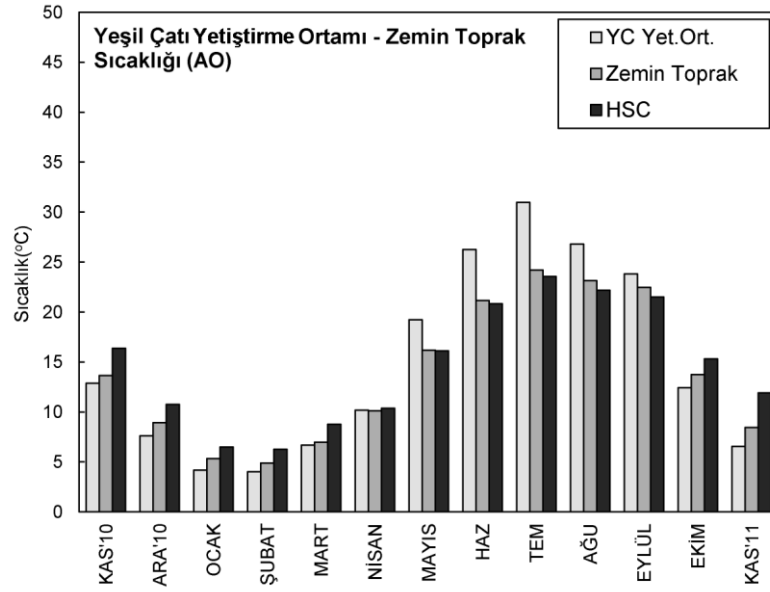
Benzer etkiler en uzun yağışsız dönem olan 13.08.2011-13.09.2011 tarihleri arasında da belirlenmiştir. En uzun kurak dönemde yetiştirme ortamındaki nem kaybı önceki dönemlere göre çok daha hızlı gerçekleşmiştir. Kurak dönemin başlangıcında yetiştirme ortamındaki nem içeriğinin oldukça yüksek olması ve hava sıcaklığının etkisiyle, yetiştirme ortamının sıcaklığı Temmuz ayında kaydedilen yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasını engellemiştir. Hava sıcaklığının yakın değerlerde ölçüldüğü bu dönem içerisinde, yeşil çatının yetiştirme ortamındaki nem kaybı 6 günde gerçekleşmiş ve nem kaybı ile birlikte yetiştirme ortamının sıcaklığında artış görülmüştür(Şekil 4.39).

Çalışma sırasında yeşil çatının yetiştirme ortamından elde edilen sıcaklık değerleri zemin toprak sıcaklığı ile karşılaştırılmıştır. İki ortam arasındaki sıcaklık farklılıkları, yeşil çatının yer seviyesine göre ne tip farklılıklar gösterdiğini belirlemek için kullanılmıştır. Elde edilen değerler incelendiğinde, hava sıcaklığındaki düşüşlerden yeşil çatı yetiştirme ortamının daha çabuk etkilendiği görülmektedir(Şekil 4.40). Mevsimsel koşullar ve hava sıcaklığındaki artışla birlikte, her iki ortam arasındaki sıcaklık farkı günlük ortalama 10°C 'ye kadar yükselmektedir.



Şekil 4.40: Günlük ortalama yetiştirme ortamı sıcaklık değerleri

Aylık ortalamalar incelendiğinde, her iki ortam sıcaklığının mevsim şartlarına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Yeşil çatının yetiştirme ortamındaki sıcaklık değişimlerinin daha kuvvetli olduğu görülmektedir(Şekil 4.41).

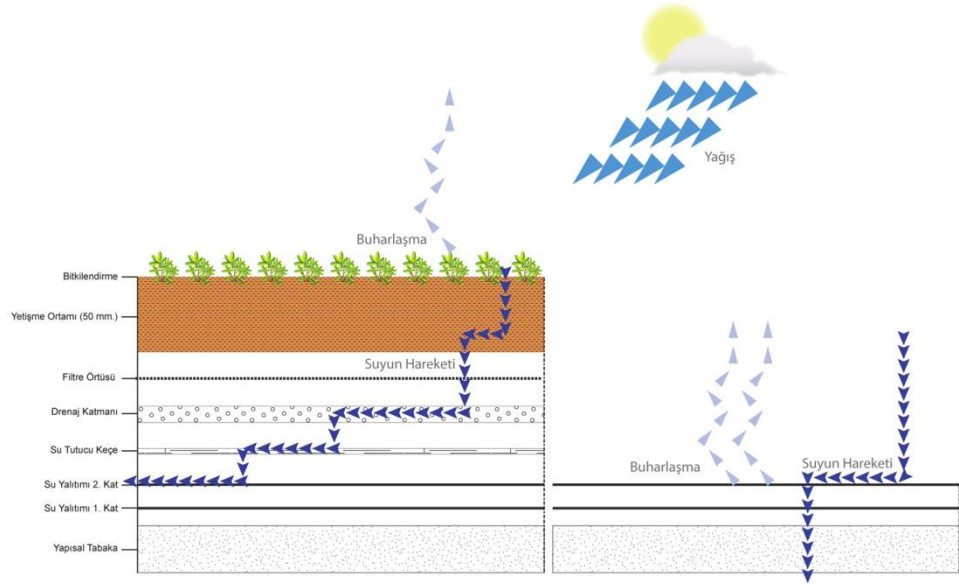


Şekil 4.41: Aylık ortalama yetiştirme ortamı sıcaklık değerleri

4.3 ARAŞTIRMA ALANINDA YÜZEYSEL AKIŞ

Son yıllarda, kentlerde kanalizasyon sistemine gelecek yükün hafifletilmesi için yeşil çatıların kullanımı ve bu yapıların kentlerde merkezi bir drenaj şebekesi oluşturması fikri dünya çapında yaygın bir görüş olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle, çalışma sırasında İstanbul iklim koşullarındaki tipik bir ekstensif çatı bahçesinin yağış sırasındaki işleyişi de araştırma kapsamına alınmıştır.

Çatı yüzeyine gelen yağış, çatı sisteminden geçerken belirli etkilere maruz kalmaktadır. Her iki çatı yüzeyine gelen yağışın belli bir bölümü, oluşan buharlaşma yoluyla atmosfere karışmaktadır. Referans çatının su tutma özelliği olmaması nedeniyle, çatıya gelen su drenaj sistemiyle tahliye edilmektedir. Yeşil çatı sisteminde ise, yetiştirme ortamı yağışla gelen suyun belli bir kısmını tutmaktadır. Artan su, drenaj ortamında biriktirilmekte, fazlası su tutucu keçe tarafından emilmektedir. Bu katmanlardan sırasıyla geçen su, drenaj ile dışarı bırakılmaktadır. Her iki çatı sisteminin yağış sırasında verdikleri tepkiler Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



Şekil 4.42: Yağış sırasında her iki çatı sisteminde yüzeysel akış oluşumu

Yağış sırasında çatı yüzeyinde toplanacak su miktarı çatı yüzey alanı ile m^2 'ye gelen yağış miktarının çarpılması ile hesaplanmaktadır. Teorik olarak, her iki çatının yüzey alanının $10,2 m^2$ olması nedeniyle, çatı sistemlerinden tahliye edilmesi beklenen su miktarı m^2 'ye gelen $1 mm$ 'lik yağış için çatı sistemlerinden $10,2 mm$ olarak hesaplanabilir. Yıllık ortalama yağış miktarı $1000 mm$ 'nin üzerinde olan Bahçeköy bölgesinde bulunan $1 m^2$ 'lik bir çatı için bu rakam yıllık $1000 mm$ olarak hesaplanmakta ve çatı yüzeylerinden yüzeysel akışa geçen su miktarının kent altyapısına getirdiği yükü ortaya koymaktadır.

Yapılan araştırmalar geçirimsiz yüzeylerin neden olduğu yüzeysel akışın azaltılması için yeşil çatıların dengeleyici etkilerinin olduğunu ortaya koymaktadır. Yeşil çatı sisteminde yağışlı günlerde oluşan etkiler, sistemdeki yağışölçer, seviye sensörleri ve toprak nem sensörü ile belirlenmeye çalışılmaktadır. Ölçümler sırasında, yağış sırasında çatıdan anlık tahliye olan suyun miktarı ve yeşil çatıların yağış sırasındaki tepkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu konuyla ilgili yapılan ölçümler, temel olarak 3 farklı şekilde elde edilmiştir. Bunlar;

- Gün içerisinde su seviyesinin değişiminin 15 dakikalık aralıklarla kaydedilmesi ve grafiklere aktarılması,

- Her iki çatı sisteminin altında bulunan haznelerin taban alanının $0,12 \text{ m}^2$ olması nedeniyle, bu haznelerde toplanan su miktarının, mm/m^2 değerine çevrilmesi ve oluşan anlık yüzeysel akışın hesaplanması,
- Günlük toplam yağış miktarı ile günlük yüzeysel akış değerlerinin karşılaştırılmasıdır.

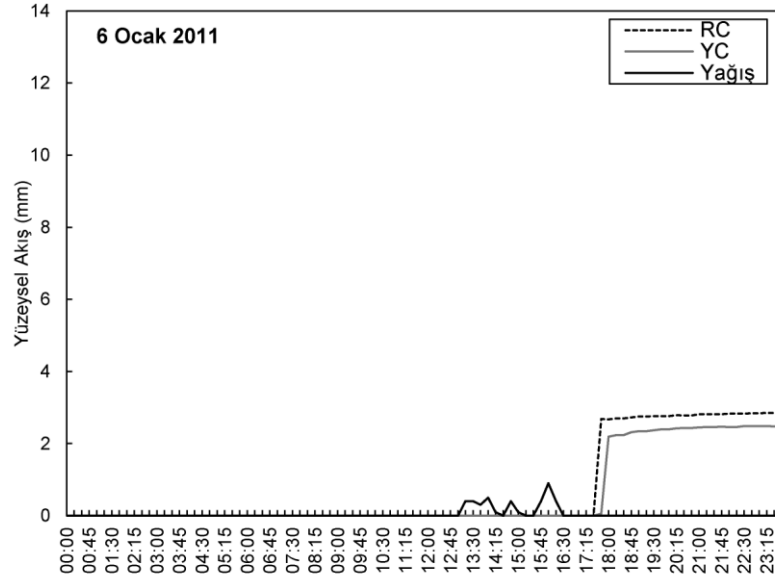
4.3.1 Yüzeysel Akış Değerleri

Yağışlı günlerde, çatı sisteminden tahliye edilen su miktarı ve hızı, büyük miktarda oluşan yağışlarda, kanalizasyon sistemine ciddi yükler getirmektedir. Aynı zamanda geçirimsiz yüzeylerin fazla olduğu kent ortamlarında, kent ortamında yüzeysel akışa geçen su miktarını da arttırmaktadır. Gün içerisindeki yağışın oluşturduğu yüzeysel akış dağılımının belirlenmesi bu açıdan önem taşımaktadır.

Çalışma sırasında yapılan ölçümlerden hareketle, ölçüm dönemindeki rastgele yağışlı günler seçilerek, bu günlerde çatı sisteminden tahliye olan su miktarının dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır.

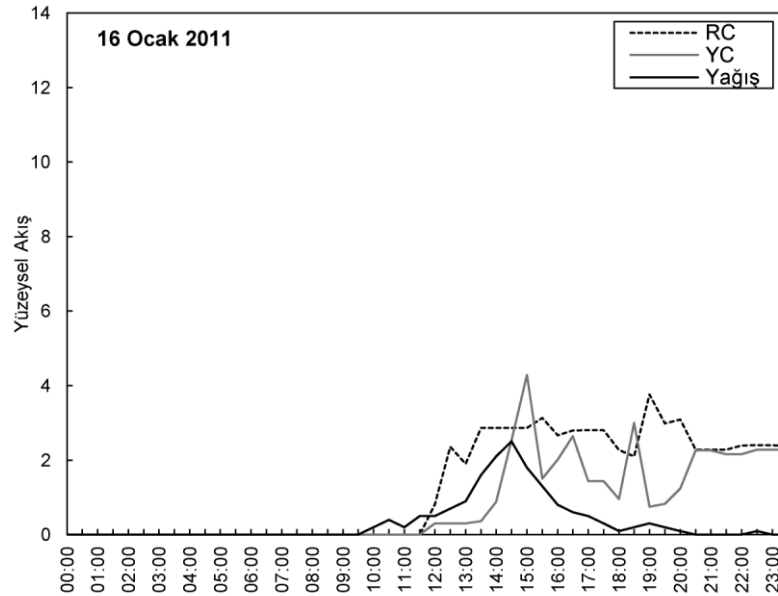
Çalışma sırasında kullanılan ölçüm sisteminde, su hazneleri belirli bir seviyeye kadar su alabilmektedir. Dolayısıyla çatı sistemlerinden tahliye edilen su miktarı grafiklerinde, tahliye edilen su miktarı su haznelerinin kapasitelerine bağlı olarak belirlenebilmiştir. Aynı zamanda seviye sensörlerinin 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.

Toplam yağış miktarı 4 mm/m^2 olan 6 Ocak 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.43'de gösterilmiştir. Yeşil çatı sistemi çatı sisteminden tahliye olan su miktarını %17 oranında azaltmıştır.



Şekil 4.43: 6 Ocak 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

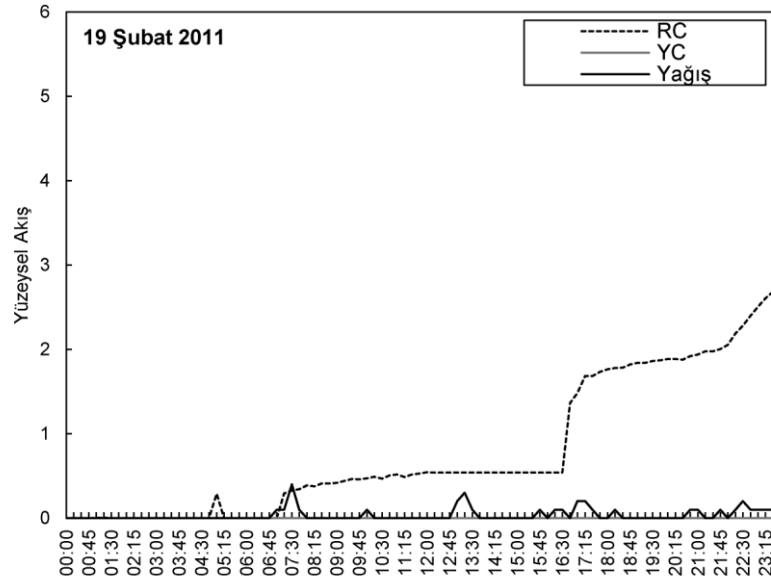
Toplam yağış miktarı 16 mm/m^2 olan 16 Ocak 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.44'de gösterilmiştir. Yeşil çatı sistemi, yağış sırasında tahliye edilen suyun yüzeysel akışa geçmesini 3 saat ertelemiş ve miktarını %37 oranında azaltmıştır.



Şekil 4.44: 16 Ocak 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

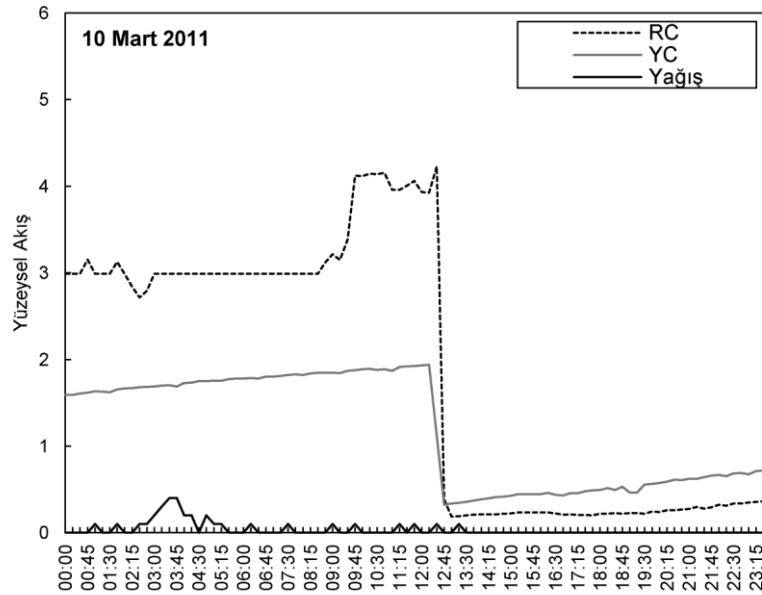
Toplam yağış miktarı $3,4 \text{ mm/m}^2$ olan 19 Şubat 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.45'de gösterilmiştir. Yeşil çatı yetiştirme ortamının nem içeriği 65,95 cbar olarak ölçülen 19 Şubat 2011 tarihinde, yeşil çatı sistemi çatı yüzeyine gelen yağışın yüzeysel akışa geçmesini engellemiş ve toplam 34 mm'lik bir su

kütlesinin yüzeysel akışa geçmesini engellemiştir. Bu tarihte yeşil çatı sistemi yüzeysel akışı %100 oranında azaltmıştır.



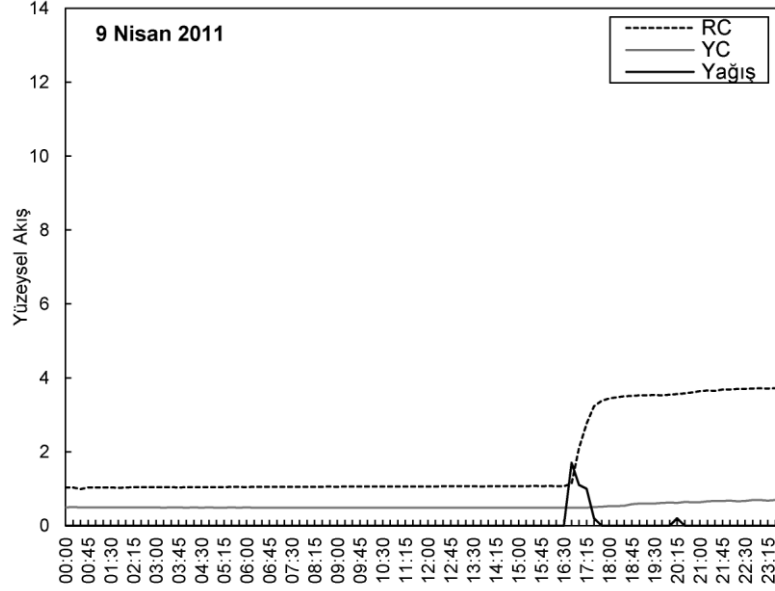
Şekil 4.45: 19 Şubat 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Toplam yağış miktarı $3,3 \text{ mm/m}^2$ olan 10 Mart 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.46'da 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.



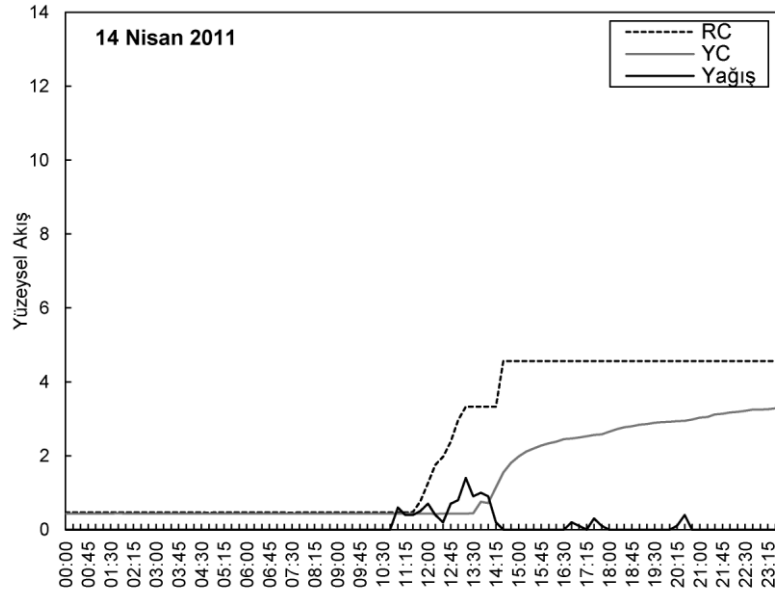
Şekil 4.46: 10 Mart 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Toplam yağış miktarı $4,2 \text{ mm/m}^2$ olan 9 Nisan 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Yeşil çatı sistemi çatı yüzeyine gelen yağışın %70’inin yüzeysel akışa geçmesini engellemiştir.



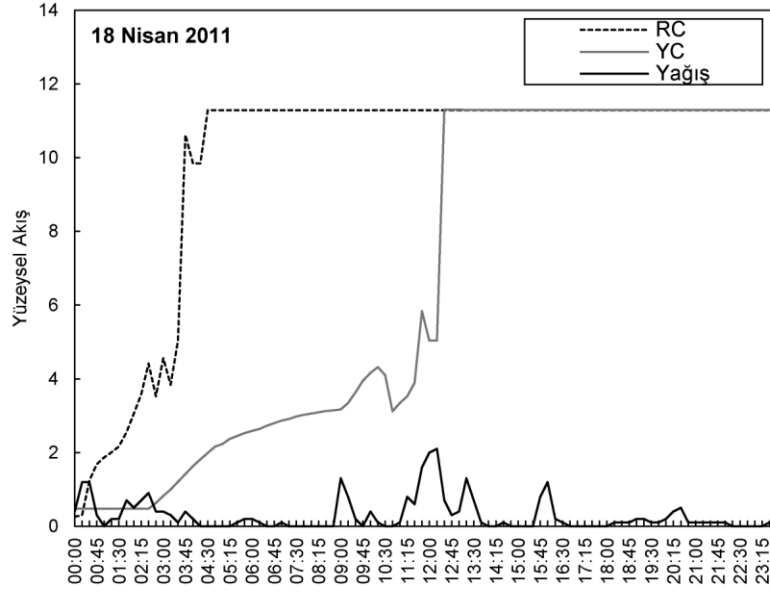
Şekil 4.47: 9 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Toplam yağış miktarı $10,3 \text{ mm/m}^2$ olan 14 Nisan 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Yeşil çatı sistemi çatı sistemlerinden tahliye edilen yüzeysel akışı 3 saat geciktirmiş ve tahliye edilen su miktarını %41 oranında azaltmıştır.



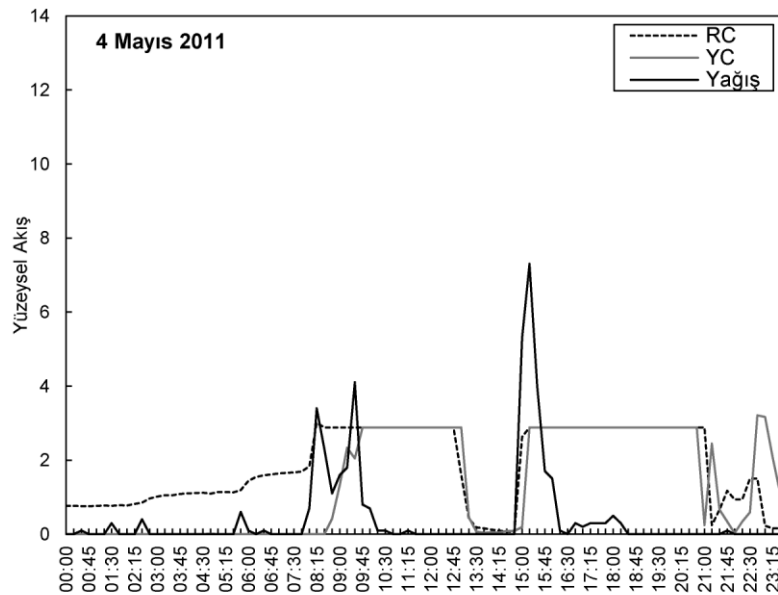
Şekil 4.48: 14 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Toplam yağış miktarı $27,4 \text{ mm/m}^2$ 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.



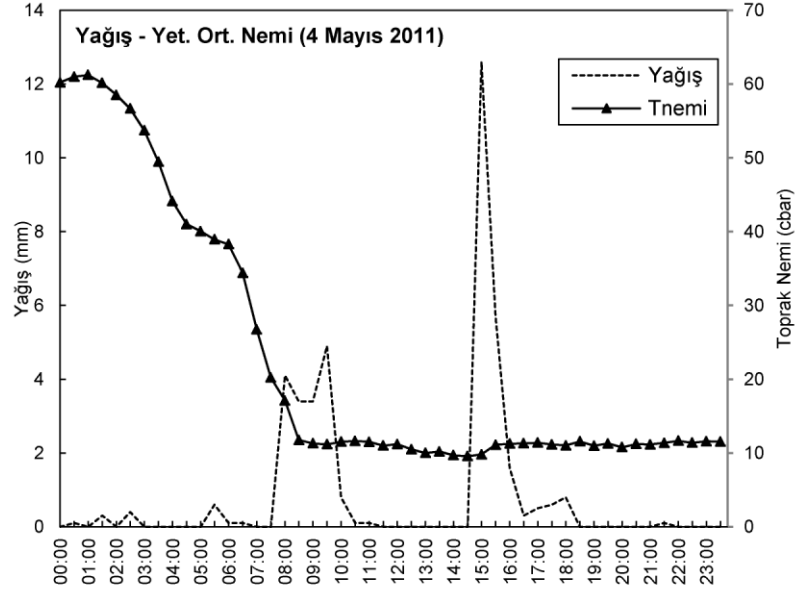
Şekil 4.49: 18 Nisan 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Toplam yağış miktarı $40,6 \text{ mm/m}^2$ olan 4 Mayıs 2011 tarihinde, çatı sistemlerinden elde edilen yüzeysel akış grafiği Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.50: 4 Mayıs 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

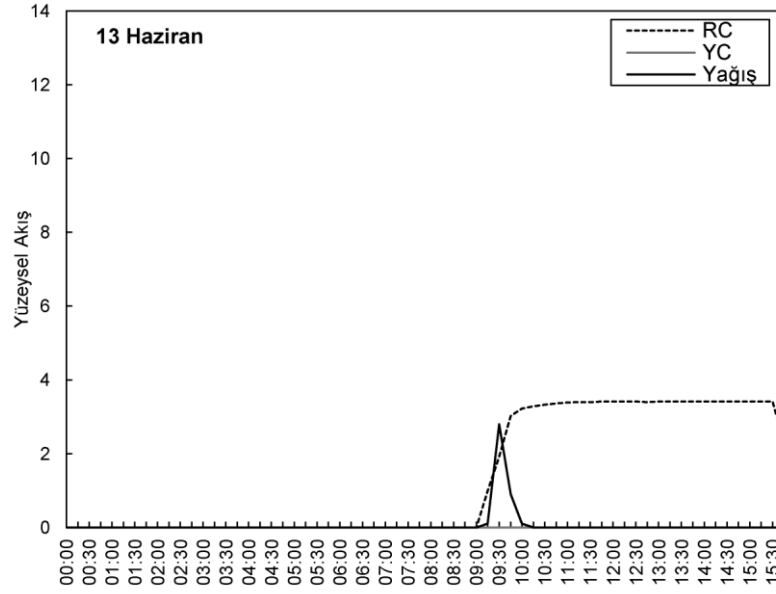
4 Mayıs 2011 tarihindeki şiddetli yağış sırasında su hazneleri yağışın kesildiği saatlerde boşaltılarak tahliye edilen su miktarının izlenmesi sağlanmıştır. Yeşil çatı sistemi ilk yüksek yağış dalgasında çatı sisteminden tahliye edilen suyun yüzeysel akışa geçmesini 1 saat ertelemiştir. İkinci şiddetli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



Şekil 4.51: 4 Mayıs 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

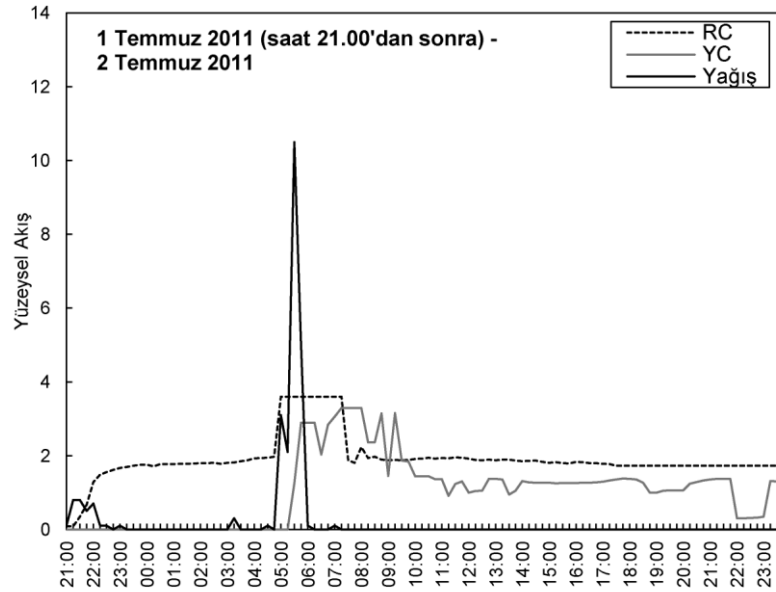
Yağışın başlamasıyla yetiştirme ortamındaki nem miktarı artmaya başlamış ve günün 8. saatinde yetiştirme ortamındaki nem oranı en yüksek seviyesine gelmiştir. Yeşil çatı sisteminin yetiştirme ortamı ve su biriktirici katmanları doygunluğa ulaşana kadar yeşil çatıdan su tahliyesi olmamıştır. Yetiştirme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

Yaz aylarında, ardışık yağışsız günlerinde etkisiyle yetiştirme ortamının nem miktarında oluşan azalma, yeşil çatı sisteminin üzerine gelen yağışın tamamına yakını bünyesinde tutmasına neden olmuştur. Şekil 4.52'de 13 Haziran tarihindeki yüzeysel akış grafiği görülmektedir. Yaklaşık 1 aylık kurak dönemden sonra oluşan 3,8 mm'lik yağışta, yeşil çatı sisteminden su tahliyesi olmamıştır. Buna ek olarak, tamamen kuru (200 cbar) durumdaki yeşil çatı yetiştirme ortamında herhangi bir nem değişimi kaydedilmemiştir.



Şekil 4.52: 13 Haziran 2011 tarihindeki yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

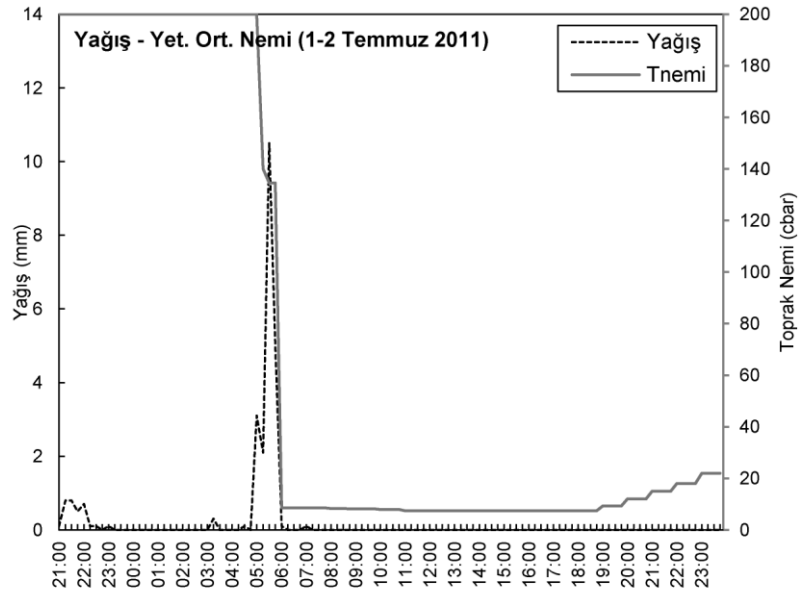
13 Haziran – 1 Temmuz 2011 tarihleri arasındaki 18 günde, toplam yağış miktarı 11 mm/m² olarak ölçülmüştür. Yetiştirme ortamındaki nem miktarı ise bir değişim göstermemiş ve 200 cbar olarak belirlenmiştir. 1-2 Temmuz tarihlerinde ölçülen 21,2 mm'lik şiddetli yağışa çatı sistemlerinin vermiş oldukları tepkiler Şekil 4.53'de gösterilmiştir.



Şekil 4.53: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde yağış miktarı ile yüzeyel akışın karşılaştırılması

Şekil 4.53’de görüldüğü üzere, yeşil çatı sistemi çatı üzerine gelen yağışın 8,8 mm’sini bünyesinde tutmuş ve 10 saat boyunca yüzeysel akışa geçmesini engellemiştir. Yağış miktarının en yüksek değerine ulaştığı saatten itibaren yeşil çatıdan su tahliyesi oluşmaya başlamıştır. Yeşil çatı sistemi yüzeysel akışı %45 oranında düşürmüştür.

Şekil 4.54’de gösterilen yetiştirme ortamında oluşan değişim incelendiğinde, oluşan yüksek miktardaki yağışla yeşil çatının yetiştirme ortamındaki nem içeriğinin 7,2 cbar’a kadar yükseldiği görülebilmektedir. Ancak yüksek hava sıcaklığı nedeniyle, yağışın bitişiyle yetiştirme ortamındaki nem değeri düşmeye başlamıştır. Yetiştirme ortamının nem miktarındaki değişim ile yüzeysel akışın başlaması aynı saat içerisinde, yağışın en yüksek noktasında gerçekleşmiştir.

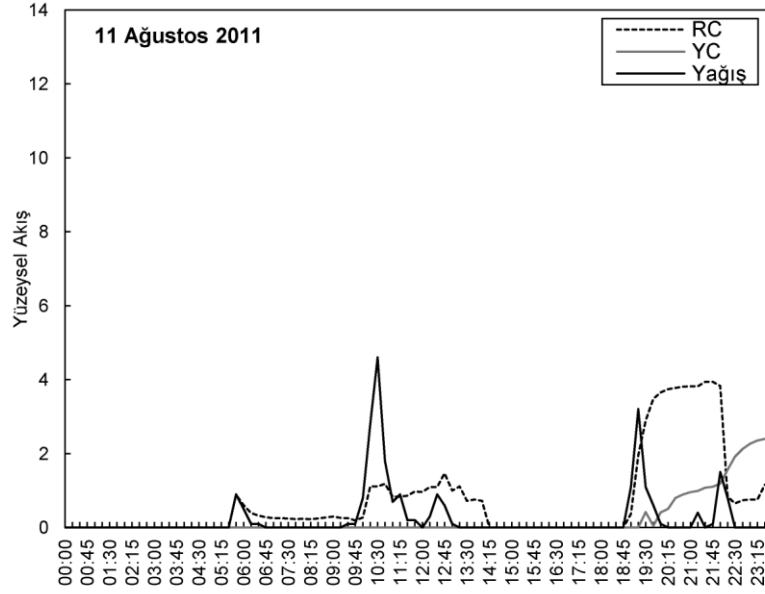


Şekil 4.54: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi

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 4.55).

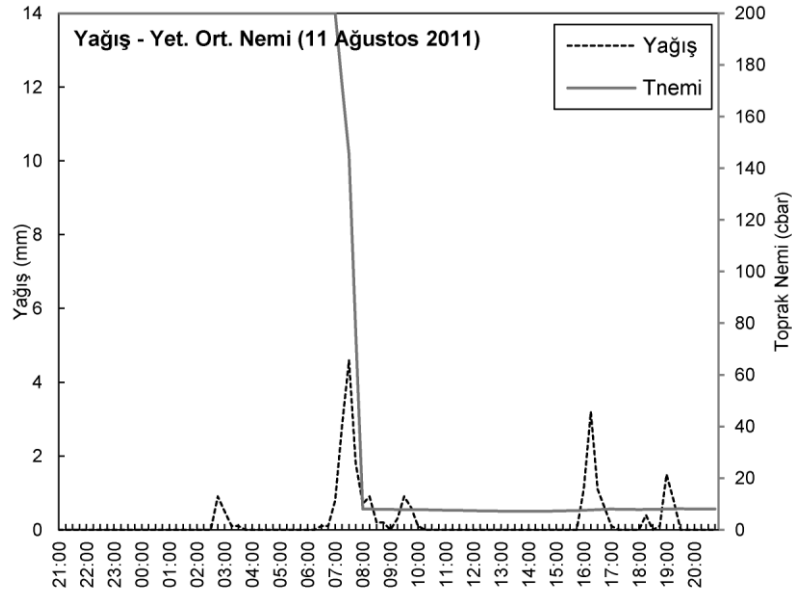
39 günlük kurak dönem sırasında oluşan su açığı nedeniyle oluşan yağış referans çatı sisteminden yağışla paralel bir şekilde tahliye edilirken, yeşil çatı sisteminden 14 saat

boyunca su tahliyesi tespit edilmemiştir. Yeşil çatı sistemi yüzeysel akışı %67 oranında düşürmüştür.



Şekil 4.55: 11 Ağustos 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

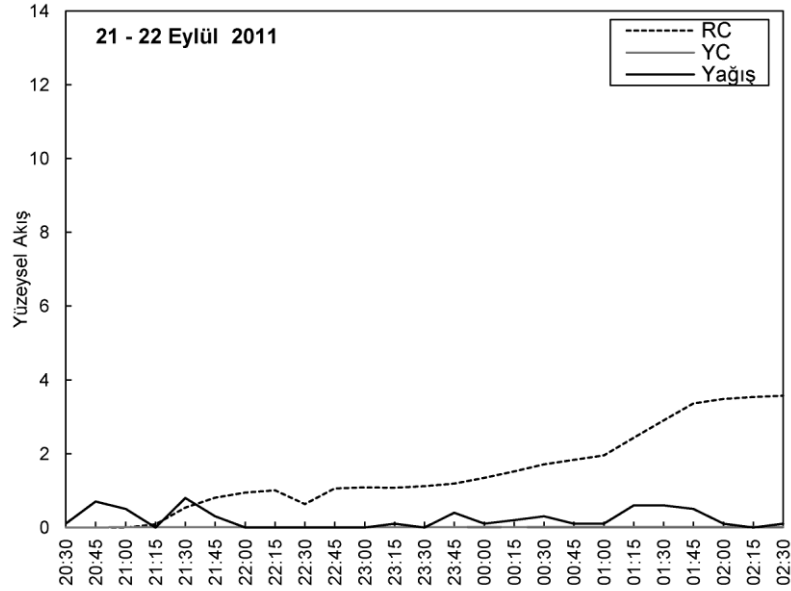
Yetiştirme ortamındaki nem değeri Şekil 4.56'da gösterilmiştir. 24,6 mm'lik yağışın, ilk 11,8 mm'lik bölümünde, yeşil çatı sisteminin yetiştirme ortamındaki nem değeri 8 cbar'a kadar yükselmiştir. Ancak yeşil çatı sisteminden herhangi bir su tahliyesi görülmemiştir.



Şekil 4.56: 11 Ağustos 2011 tarihinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi

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

11 Ağustos sonrasında, bir önceki döneme benzer bir biçimde 21 Eylül 2011 tarihine kadar uzun bir ardışık yağışsız dönem kaydedilmiş ve bu dönem 21-22 Eylül tarihinde oluşan 5,6 mm'lik bir yağış ile sonlanmıştır. Bu tarihte oluşan yağışa çatı sistemlerinin vermiş oldukları tepkiler Şekil 4.57'de gösterilmiştir.

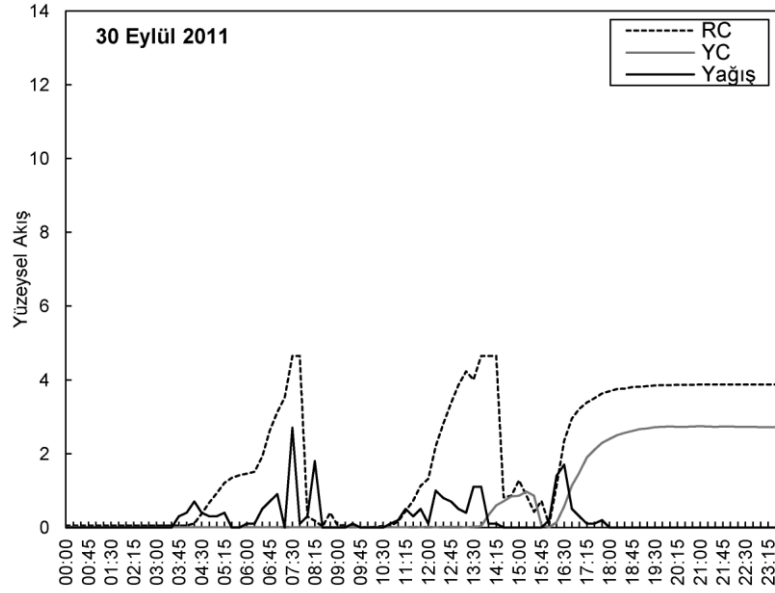


Şekil 4.57: 21-22 Eylül 2011 tarihlerinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi

Şekilde görüldüğü üzere, yeşil çatı sistemi çatı yüzeyine gelen yağışın yüzeysel akışa geçmesini tamamen engellerken, referans çatıdan tahliye olan su miktarı sürekli bir artış göstermiştir. Yeşil çatı sistemi kurak dönemin ardından oluşan yağışın tamamını bünyesinde tutmuş ve 56 mm'lik bir yüzeysel akışı engellemiştir.

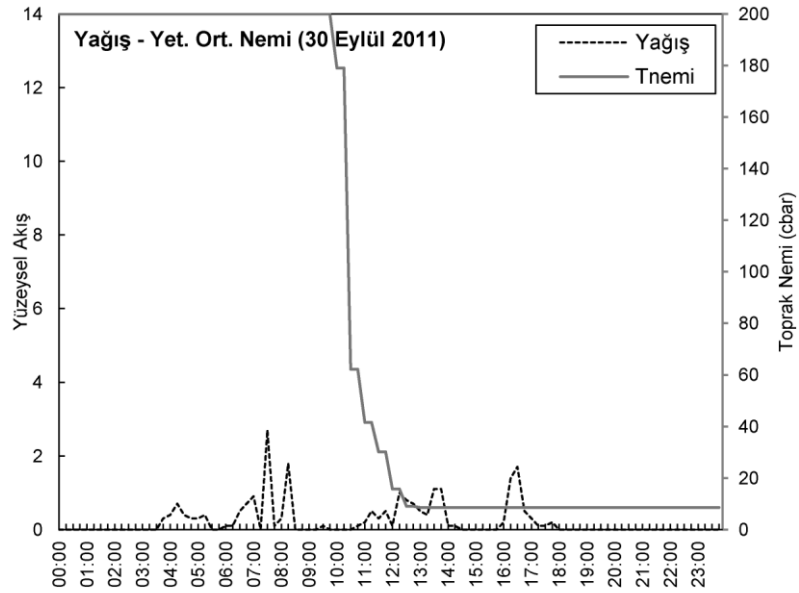
Uzun ardışık yağışsız dönemlerde yeşil çatı sistemi yetiştirme ortamındaki ve yapısal katmanlardaki nem açığı nedeniyle yüzeysel akışı tamamen engellemiş ve katmanları içerisinde depolamıştır. Çalışma döneminde 2011 yılının Eylül ayının sonlarında başlayan yağışlı dönemde, yeşil çatı sistemi kurak dönemlerden farklı olarak yüzeysel akışı erteleme ve azaltma gibi işlevler üstlenmiştir.

30 Eylül 2011 tarihinde kurak dönemden sonraki ilk kuvvetli yağış görülmüştür. 22,1 mm'lik bu yağış sırasında yeşil çatı sistemi yüzeyel akışı belirgin bir oranda azaltmış ve ertelemiştir. Yeşil çatının bu tarihte oluşan yüzeyel akışı referans çatıya oranla %57 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Şekil 4.58).



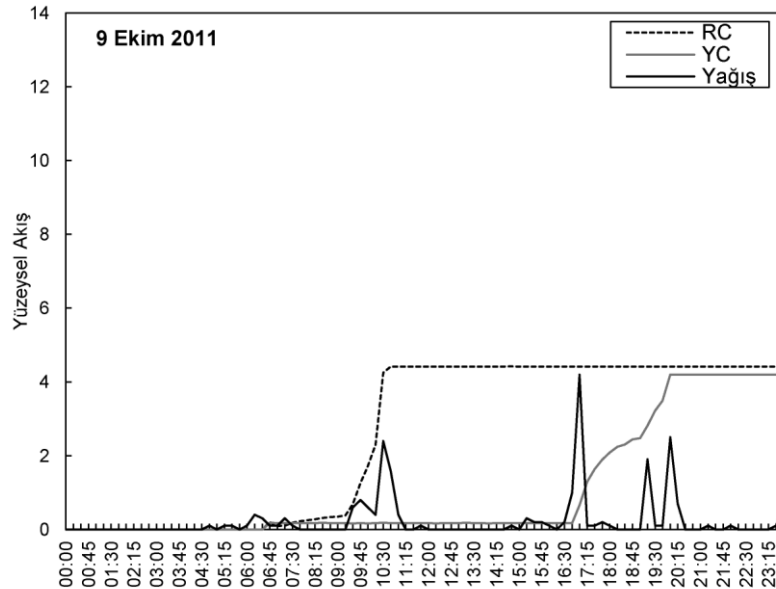
Şekil 4.58: 30 Eylül 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeyel akışın karşılaştırılması

30 Eylül tarihinde, yetiştirme ortamındaki nem değeri 14 saat içerisinde oluşan 17,4 mm'lik yağıştan sonra 200 cbar'dan 8,59 cbar'a yükselmiş ve yeşil çatı sisteminden su tahliyesi olmuştur(Şekil 4.59).



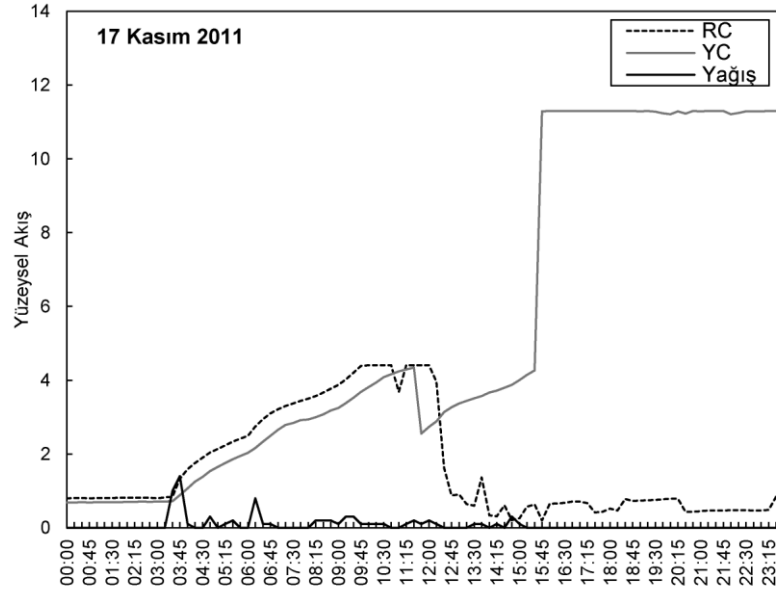
Şekil 4.59: 30 Eylül 2011 tarihinde yetiştirme ortamındaki nem değeri ile yağış ilişkisi

9 Ekim 2011 tarihinde oluşan 21,7 mm’lik yağışta yeşil çatı sistemi çatı sisteminden tahliye olan ve yüzeysel akışa geçen su miktarını 9 saat ertelemiştir. Yeşil çatı sistemi, çatı yüzeyine gelen yağışın %59,2’sinin yüzeysel akışa dönüşmesini engellemiştir. Yeşil çatı sistemi aynı zamanda yüzeysel akışı 11 saate yakın bir süre ertelemiştir (Şekil 4.60).

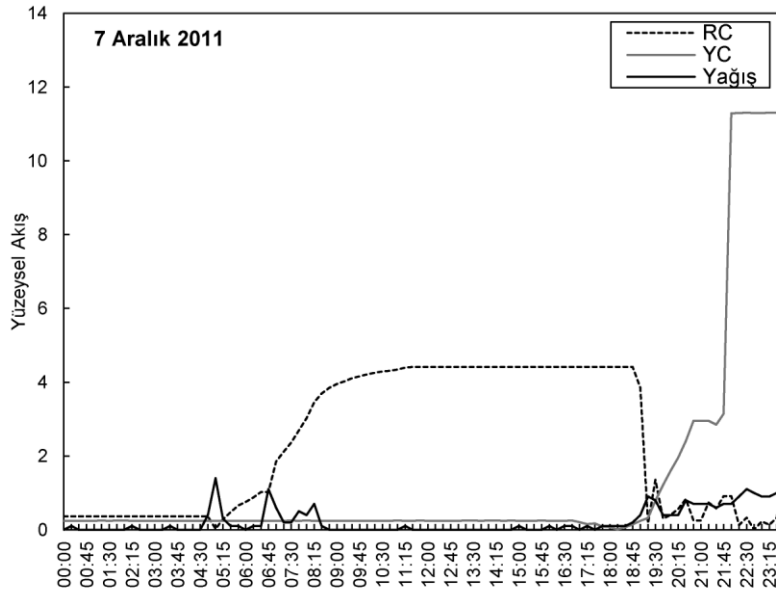


Şekil 4.60: 9 Ekim 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

Yeşil çatı sisteminin yüzeysel akışı azaltma ve geciktirme etkisi, Şekil 4.61 ve 4.62’de görülen 17 Kasım 2011 ve 7 Aralık 2011 tarihindeki yağışlı günlerde de tespit edilmiştir. Ölçüm döneminde yeşil çatı sistemi, yüzeysel akışa geçen su miktarını %10 – 100 arasında değişen oranlarda azaltmış ya da 1-10 saat arasında değişen zaman aralıklarında geciktirmeyi sağlamıştır.



Şekil 4.61: 17 Kasım 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması



Şekil 4.62: 7 Aralık 2011 tarihinde yağış miktarı ile yüzeysel akışın karşılaştırılması

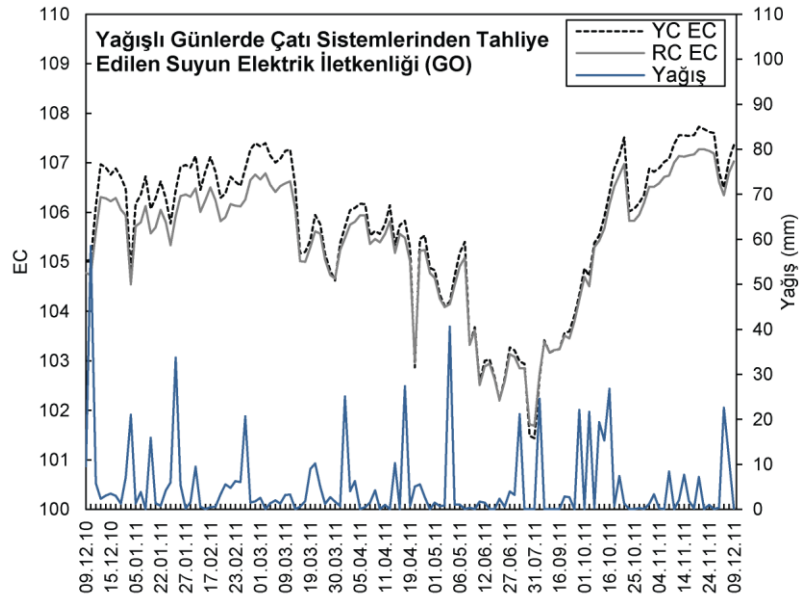
4.3.2 Yüzeysel Akışa Geçen Suyun Elektrik İletkenliği ve pH Değerleri

Çalışma sırasında, her iki çatı sisteminden tahliye edilen su kalitesinin ölçülebilmesi için, çatılardan tahliye edilen suyun toplandığı haznelerin içerisine dijital elektrik iletkenliği ve pH ölçerler yerleştirilmiştir. Her yağıştan sonra, su hazneleri boşaltılmış ve yeni yağışlarda elde edilen değerler kaydedilmiştir. Yağışlı günlerde elde edilen değerler, günlük ve aylık ortalamalar olarak ortaya konulmuştur.

Çalışmada ölçülen elektrik iletkenliği değerleri, cm'deki miliSiemens değeri ile ifade edilmektedir. Bu değer, çözültide içerisinde bulunan toplam tuz ve iyonların miktarını belirlemektedir.

Çalışma sırasında yapılan ölçümlerde, yeşil çatıdan tahliye edilen suyun elektrik iletkenliği değeri daha yüksektir. Bunun en büyük nedeni, yetiştirme ortamında bulunan bitki ve bitki köklerinin, organik maddelerin ve yetiştirme ortamında bulunan bileşiklerin filtre edilen suya karışmasıdır. Ayrıca uzun süreli yağışsız dönemlerde çatı yüzeylerinde biriken partiküllerin ve çatı yüzeyine gelen yağışın, atmosfer ve kentsel etkilerle bu değişimde rol oynaması olasıdır.

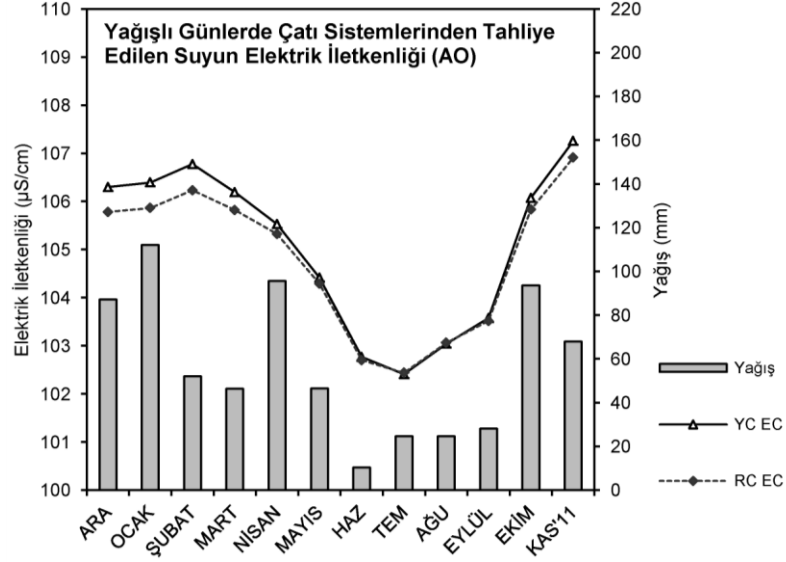
Yeşil çatının kurulduğu ilk dönemlerde, elektrik iletkenliği değerinin 107 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerlerine kadar ulaştığı görülmektedir. İlk dönemlerdeki bu değer yüksek olması, yetiştirme ortamının yağışlarla yıkanması sonucunda, içeriğinde bulunan maddelerin drenaj sistemine karışması ile oluşmuştur. Ölçüm döneminin ilerleyen günlerinde, yeşil çatıdan tahliye edilen suyun elektrik iletkenliği değerlerinde azalma eğilimi göze çarpmaktadır (Şekil 4.63). Bitkilerin ilk dikim zamanlarına göre çatıyı kaplama oranlarının artmasının da bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.63: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun günlük ortalama elektrik iletkenliği değerleri

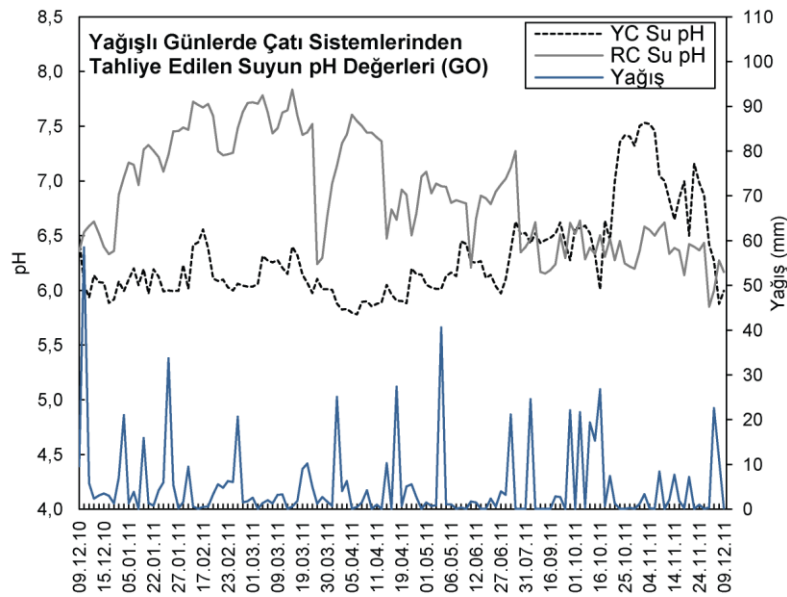
Günlük ortalama elektrik iletkenliği değerleri incelendiğinde, yağış miktarının arttığı günlerde, yetiştirme ortamındaki yıkanma nedeniyle, tahliye edilen suyun elektrik

iletkenliğinin de arttığı görülmektedir. Elde edilen bulgularda, günlük 20 mm'nin üzerindeki yağışlarda, elektrik iletkenliği değerlerinde belirgin azalmalar kaydedilmiş, su içerisindeki katı madde miktarı azalmıştır (Şekil 4.63 ve 4.64).



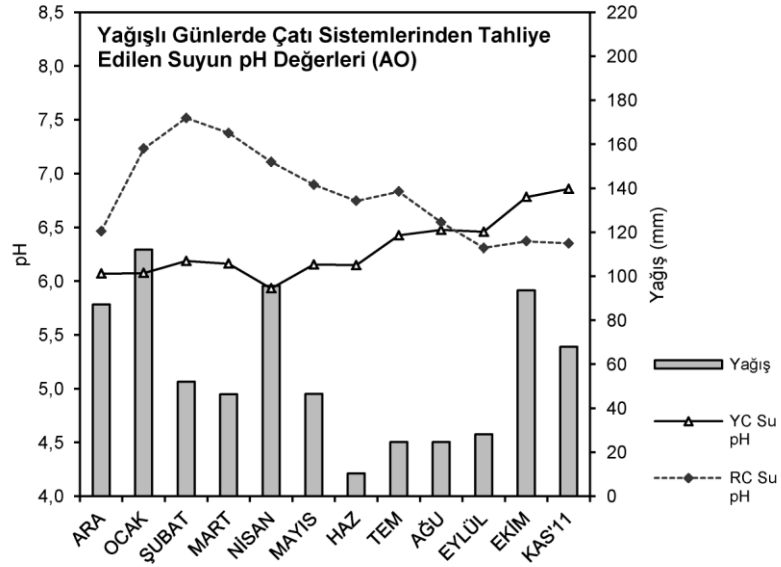
Şekil 4.64: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun aylık ortalama elektrik iletkenliği değerleri

Çatı üzerine gelen yağışı etkileyen faktörler, her iki çatı sisteminden tahliye edilen suyun pH değerlerine de etki etmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde, yeşil çatı sisteminden tahliye edilen suyun pH değeri nötr değerlere yakın (5,8 – 6,6 arasında) bir dağılım göstermiştir. Referans çatıdan tahliye edilen suyun pH değerleri incelendiğinde ise, daha bazık (6,2 – 7,8 arasında) bir dağılım görülmektedir (Şekil 4.65).



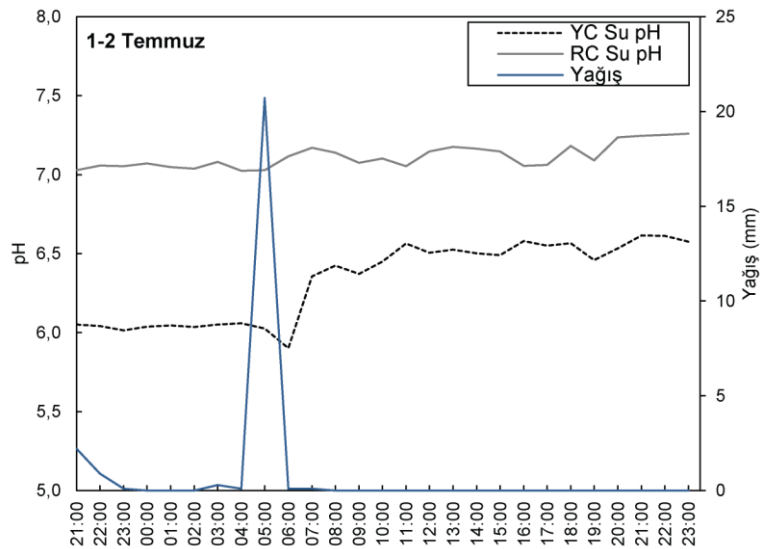
Şekil 4.65: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun günlük ortalama pH değerleri

Elde edilen veriler incelendiğinde, çatı yüzeyine gelen yağışın pH değerlerinde oluşan değişimlerin, yeşil çatının yetiştirme ortamı tarafından düzenlendiğini söylemek mümkün olacaktır. Günlük ve aylık ortalama pH değerleri Şekil 4.65 ve 4.66'de gösterilmiştir.



Şekil 4.66: Her iki çatı sisteminden yağışlı günlerde tahliye edilen suyun aylık ortalama pH değerleri

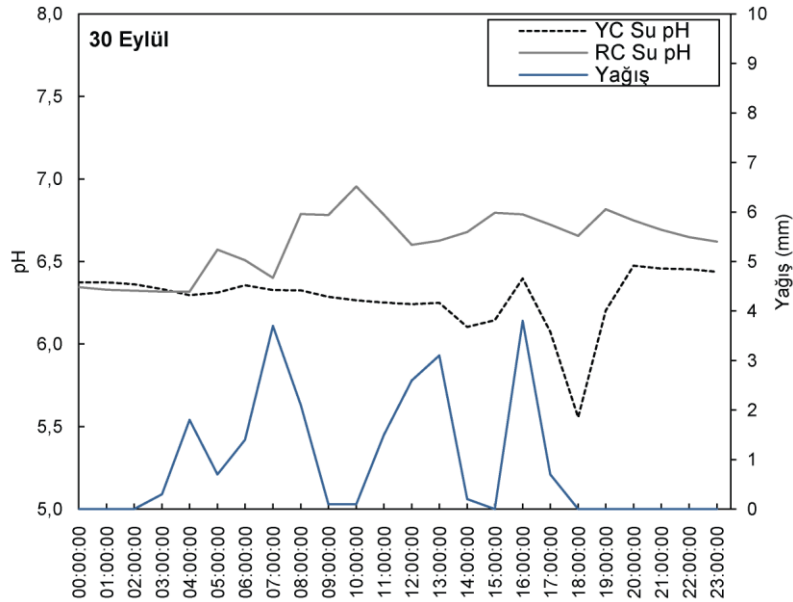
Yağış sırasında, çatı yüzeyine gelen yağışın pH değeri ile bu yağışın çatı sistemlerinden tahliye edilirken pH değerindeki değişim 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde ölçülmüştür(Şekil 4.67).



Şekil 4.67: 1-2 Temmuz 2011 tarihlerinde çatı sistemlerinden tahliye edilen suyun pH değerlerindeki değişim

Çatı yüzeyine gelen yağışın en yüksek noktasında ölçülen pH değeri 7,43 olarak kaydedilmiştir. Referans çatıdan tahliye olan suyun pH değeri yağış boyunca 7,0 – 7,3 aralığında kaydedilmiştir. Yeşil çatı sisteminden tahliye edilen suyun pH değeri ise 5,9 – 6,6 arasında değişim göstermiştir. Yağışın en yüksek değere ulaştığı 04.00-06.00 saatleri arasında, yeşil çatı sisteminden tahliye olan su miktarı artmış ve bu suyun pH değeri gün içerisindeki en düşük değere (5,9) ulaşmıştır. Yağışın azalmasıyla yeşil çatıdan tahliye olan suyun pH değeri yükselerek, 6,4-6,6 değerlerine ulaşmıştır. Yeşil çatı sistemi çatı yüzeyine gelen yağışın pH değerini nötr değerlere yakın bir değere dönüştürerek tahliye edilmesini sağlamıştır.

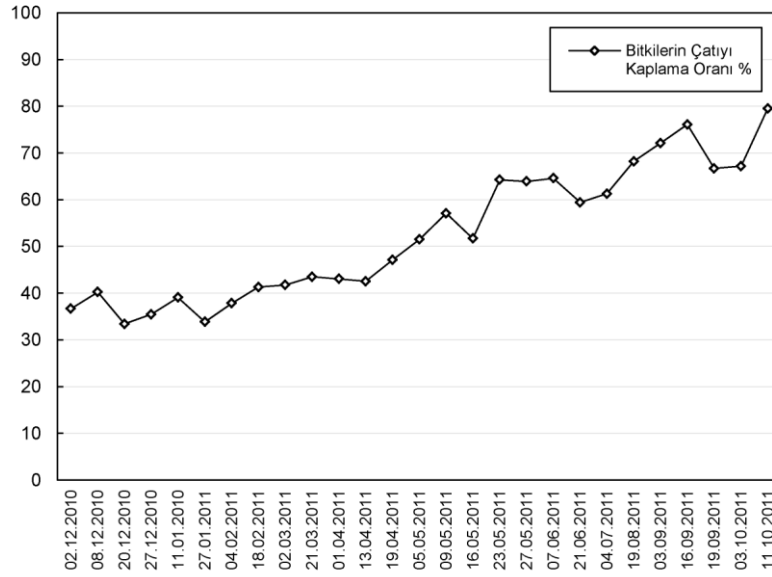
30 Eylül 2010 tarihinde, çatı yüzeyine gelen yağışın pH değeri 7,15 olarak ölçülmüştür. Referans çatıdan elde edilen pH değerleri 6,3 – 7,0 arasında değişim gösterirken, yeşil çatıdan elde edilen pH değerleri 5,6 – 6,5 aralığında kaydedilmiştir. Yeşil çatıdan su tahliyesinin başladığı 19. saatte yeşil çatıdan tahliye olan su miktarının pH değeri 5,6 iken, yüzeysel akışın artmasıyla bu değer 6,5 pH değerine kadar ulaşmış ve bu değerde sabitlenmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere, yeşil çatı sistemi çatı üzerine gelen ve 7,15 pH değerine sahip olan yağışın, çatı sisteminden geçerken nötr değerlere ulaşmasını sağlamıştır(Şekil 4.68).



Şekil 4.68: 30 Eylül 2011 tarihlerinde çatı sistemlerinden tahliye edilen suyun pH değerlerindeki değişim

Tez çalışması sırasında çatı üzerindeki bitkiler ile ilgili gözlemler yapılmıştır. Bitkilerin çatı yetiştirme ortamına dikildiği tarihten itibaren rastgele aralıklarla çekilen fotoğraflarla bitkilerin gelişimi belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma sırasında çatı yüzeyinden elde edilen fotoğraflarda, bitkilerin kapladığı alan renk değerlerine göre fotoğraf üzerinde belirlenerek, fotoğrafın çekildiği noktada bulunan 45 cm²'lik yer ölçeği ile oranlanmış ve bitkilerin çatıyı kaplama oranı elde edilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 4.69'da gösterilmiştir.



Şekil 4.69: Çalışma dönemi boyunca bitkilerin çatıyı kaplama oranı

Çatı üzerine bitki dikiminin yapıldığı gün olan 18.09.2010 tarihini takip eden dönemde, mevsimsel koşullar nedeniyle yaprak alan indeksi yada bitkilerin çatıyı kaplama oranı %40 oranında kaydedilmiştir. Bahar aylarında vejetasyon sürecinin başlangıcı ile birlikte, yeşil çatı üzerindeki bitkisel dokudaki gelişim nedeniyle, bitkilerin çatıyı kaplama alanı %65-70 oranına yükselmiştir (EK-1). Yaz döneminde oluşan kurak dönemlerde bitkilerin çatıyı kaplama oranında durgunluk ve düşüşler görülmüştür. Sonbahardaki yağışlı dönemle birlikte bitkisel dokudaki gelişim yeniden başlamış ve bitkilerin çatıyı kaplama oranı %84'e kadar yükselmiştir. 2011 yılının sonbahar aylarında çatı yüzeyinden çekilen örnek fotoğraf Şekil 4.70'de gösterilmiştir.



Şekil 4.70 – Çatı yüzeyinden elde edilen fotoğraf örneği

Çatı üzerindeki bitkiler, çalışmada kullanılan 5 cm'lik yetiştirme ortamında özellikle kurak dönemlerde oldukça zor koşullara maruz kalmıştır. Yetiştirme ortamının sığ olması, bitki köklerinin çeşitli sıcaklık değişimlerine ve hızlı nem kaybına uğramasına neden olmuştur. Çalışma dönemi boyunca yapılan gözlemler, özellikle kış ve yaz aylarında bitkisel dokunun görsel belirginliğinin azaldığını göstermiştir. Bu estetik açıdan kötü bir görünüme yol açmakla birlikte, bitkilerin metabolizma faaliyetlerini azalttığını da göstermektedir. Ancak bitkiler ölçüm dönemi boyunca hayatta kalmışlardır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması 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.

Yeşil çatı sistemlerinin nicel ve analitik açıdan değerlendirilmesi ile ilgili olarak ülkemizdeki bilimsel çalışmalar henüz yeterli seviyede değildir. Bu nedenle, çalışma gerçekleştirilirken dünyada bu konuda deneyim sahibi olan Almanya, Kanada ve ABD'deki araştırma merkezleri örnek olarak seçilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında bitkisel denemeler yapılmış ve yeşil çatı sisteminin yapısal özelliğine karar verilmiştir. Çalışma sırasında kullanılan yeşil çatı sisteminin seçiminde mümkün olan en sığ ve en hafif yapısal katmanlar kullanılmıştır. Literatür araştırması sırasında, yetiştirme ortamı kullanılarak oluşturulan ekstensif yeşil çatı sistemlerinde kullanılan en az yetiştirme ortamı derinliği 50 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan 50 – 55 mm'lik yetiştirme ortamı derin yetiştirme ortamlarına oranla daha düşük bir su tutma oranına sahiptir ve bitkilerin köklerinin gelişmesini sınırlamaktadır. Ancak seçilen yetiştirme ortamının derinliği bitkilerin büyüüp gelişmesine olanak verirken, yapı üzerine getirilen ağırlığı en aza indirmektedir. Çalışma sırasında oldukça sığ bir yetiştirme ortamının tercih edilmesinin başlıca sebebi, sınır değerlerde bitkilerin çatı üzerindeki gelişim düzeylerinin belirlenmesi ve bu tip bir yeşil çatı sisteminin kent koşullarındaki değerlendirmesidir. Yeşil çatı sistemlerinde kullanılacak bitki örtüsünün tipi, yetiştirme ortamının derinliği, yeşil çatıyı ve yapının üst yüzeyini oluşturan malzemelerin değişmesi ölçümlerde farklılıklar yaratacaktır. İlerleyen dönemlerde yetiştirme ortamının tipi, derinliği ve bitki türleri ile ilgili çeşitli denemelerin gerçekleştirilmesi de planlanmaktadır.

Çalışma sırasında elde edilen **iklimsel verilerle** ilgili genel bir değerlendirme yapmak amacıyla, Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait 1974 – 2004 yıllarını kapsayan 30 yıllık meteorolojik veriler ile ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın çatı ve çevresindeki mikroklimatik özelliklere odaklanması, elde edilen verilerin İstanbul'daki diğer bölgelere uyarlanabilmesini sağlayacaktır.

Tez çalışmasında ölçüm dönemi olan 2010 – 2011 yılları Kasım ayları arasındaki ortalama hava sıcaklığı ölçümleri, 30 yıllık ortalama değerlerin $2,1^{\circ}\text{C}$ 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 $3 - 7^{\circ}\text{C}$ üzerinde seyretmiştir.

Araştırma alanının doğu cephesinin ağaçlarla kaplı bir şevle sınırlanmış olması, çatı yüzeylerine etki eden rüzgar ve güneşlenme durumunu da etkilemiştir. Ağaçların mevsimlere göre yapraklanma özellikleri de meteorolojik parametreleri etkileyen diğer faktörler olarak belirlenmiştir.

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 $1252,6 \text{ mm/m}^2$ iken, tez çalışması sırasında ölçülen yağış miktarı $713,5 \text{ mm/m}^2$ olmuştur. Ölçüm dönemi boyunca kaydedilen toplam yağış miktarı, mevsim normallerinin %43'ü kadardır. Dolayısıyla tez çalışmasında 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 tespit etmiştir. Yüzey sıcaklığındaki düşüşlerin sıcak ve kurak iklimlerde daha yüksek miktarda görüldüğü de aynı çalışmada belirtilmiştir.

Kanada Ottawa'da Ulusal Araştırma Konseyi'nden Liu ve Baskaran'ın (2003) 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.

Aynı çalışmada, yeşil çatının altında bulunan çatı levhasının sıcaklığı ölçüm döneminin 18 günü 30°C'nin üzerinde ölçülmüş ve 40°C'ye hiç ulaşmamıştır. Referans çatının su yalıtımındaki sıcaklık dalgalanmalarının medyan değerleri 42 ile 47°C arasında gerçekleşmiştir. Yeşil çatının altında bulunan yapısal katmanda ise sıcaklık dalgalanmaları 5-71°C arasında ölçülmüştür.

Spala ve diğ. (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 diğ. (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.

Fioretti ve diğ.(2010) bina çatıları üzerinde bitki yetiştirmenin iklimsel özellikler nedeniyle çok da uygun olmadığı Akdeniz iklim şartlarında, bir yeşil çatının sürdürülebilir olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada elde edilen bulgular, yeşil çatı sistemlerinin yapının günlük enerji ihtiyacını düşürdüğünü göstermiştir.

Bass ve Baskaran'ın (2003) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, farklı sezonlardaki belirlenen günlerde aynı sıcaklık dağılımı olduğunu belirlenmiştir. Tipik bir yaz gününde referans çatının altındaki su yalıtımı 70°C'yi geçerken referans çatının su yalıtımının sıcaklığı 25°C'de kalmıştır. Karla kaplı bir kış gününde hava sıcaklığına bağlı olarak referans çatının altındaki su yalıtımının sıcaklığı 5-10°C arasında değişmiş ve yeşil çatının altında bulunan su yalıtımının sıcaklığı 1-5°C arasında salınım yapmıştır. Yeşil çatının altında bulunan katmanların referans çatıya oranla daha durağan bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu ortaya konmuştur. Wong ve diğ. (2003) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, farklı vejetasyon örtülerini denemiş ve bunların sert yüzeylerden daha düşük sıcaklıklara sahip olduğunu tespit etmiştir. Sert yüzeyler en fazla 57°C'lik sıcaklığa ulaşırken, bitkisel yüzeyler 36°C olarak ölçülmüştür.

Teemsuk ve Mander (2009) yeşil çatı yüzeyinin ısınma-soğuma döngüsünün daha hızlı olduğunu ve Estonya iklim şartlarında en fazla 40°C'lik bir salınım yaptığını tespit etmiştir. Ayrıca çatı katmanlarındaki günlük ortalama sıcaklık dağılımlarının normal dağılıma sahip olmadığını ve elde edilen veriler arasında kuvvetli bir korelasyon olduğunu tespit etmiştir. Tez çalışmasında günlük ortalama sıcaklık değerlerine uygulanan Pearson-Korelasyon Testi ile sıcaklık değerleri arasındaki korelasyon katsayıları (R) elde edilmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1: Çatı sistemlerinin yapısal katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (R)

R	YCYZY	YC1	YCODA	RC YZY	RC1	RC ODA	HSC
YCYZY		0,975	0,967	0,990	X	X	0,954
YC1	0,975		0,994	X	0,974	X	0,931
YCODA	0,967	0,994		X	N/A	X	0,931
RC YZY	0,990	X	X		0,997	0,973	0,950
RC1	X	0,974	X	0,997		0,975	0,943
RC ODA	X	X	0,990	0,973	0,975		0,938
HSC	0,954	0,931	0,931	0,950	0,943	0,938	

Tez çalışmasında elde edilmesi beklenen bir sonuç olarak, çatı katmanlarından elde edilen sıcaklık değerleri arasında kuvvetli bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen değerler, Teemsuk ve Mander'in (2009) yapmış oldukları araştırmayla benzerlik göstermiştir.

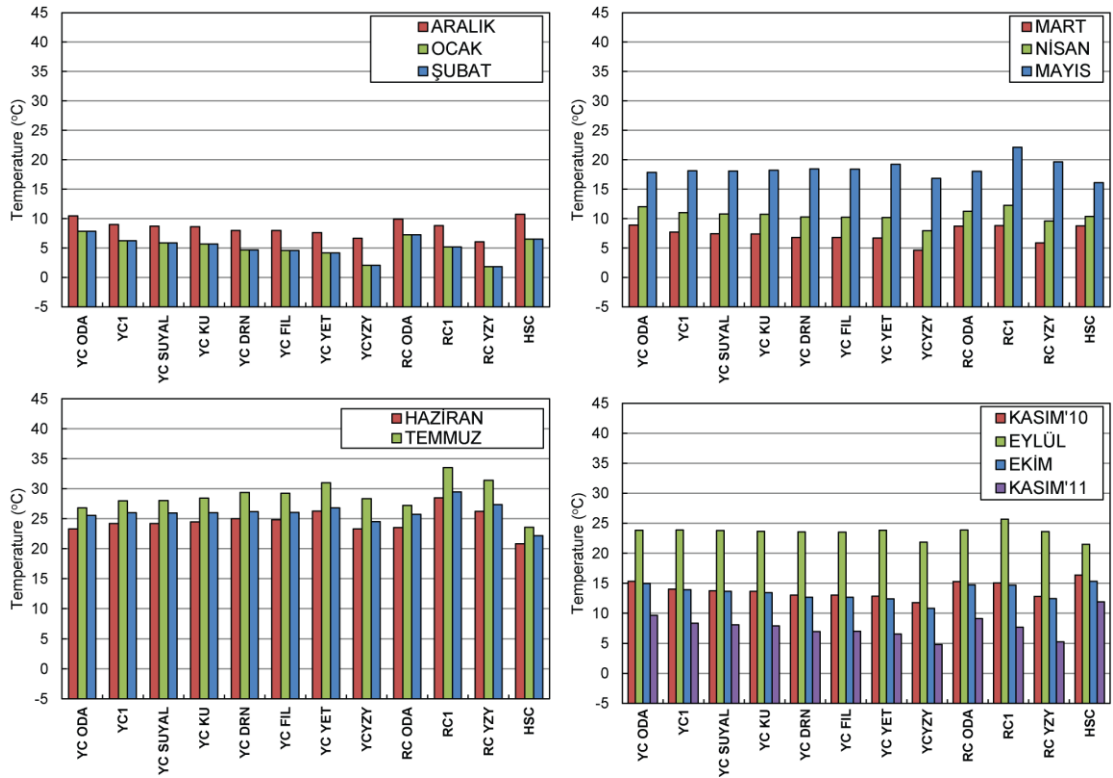
Çalışma sırasında elde edilen sıcaklık dağılımlarına göre özellikle yaz aylarında yeşil çatı sisteminin yapı kabuğunu dış ortamda oluşan etkilerden korumuş olduğu görülmektedir. Referans çatının yüzey sıcaklığı 28 gün boyunca 30°C'nin üzerinde sıcaklığa ulaşırken, yeşil çatının yüzeyinin 30°C'nin üzerinde 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, tez çalışmasında da ortaya konulmuştur. İklimsel özellikler nedeniyle, çatı sistemlerinde tespit 55°C'nin üzerindeki sıcaklıklar, tez çalışması 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. Tez çalışmasında 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.

Çatı sistemlerinden elde edilen verilerle ilgili genel bir değerlendirme yapabilmek için, çatı katmanlarında mevsimlere göre oluşan aylık sıcaklık değerlerinin dağılımı Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Aylık katman sıcaklıkları incelendiğinde, çatı katmanlarında oluşan sıcaklık değerlerinin benzer bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1: Çatı katmanlarından elde edilen aylık sıcaklık değerleri

Elde edilen veriler, farklı aylarda çatı katmanlarında oluşan sıcaklık dağılımlarının benzer olduğu görülmektedir. Dış ortam şartlarına göre sıcaklık değerleri farklılık göstermiş olsa da, sıcaklığın katmanlardaki dağılımı aynıdır. Grafikte, ölçülen en düşük değerlerin yeşil çatının yüzey sıcaklığı olduğu, hava sıcaklığına bağlı olarak en yüksek sıcaklık değerlerinin, yeşil çatının altında bulunan odadan ve referans çatının en alt katmanından elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde, yeşil çatının yetiştirme

ortamının altında bulunan katmanları (filtre örtüsü, drenaj katmanı, su tutucu keçe, su yalıtımı) arasında belirgin sıcaklık farkları tespit edilememiş, yeşil çatının yüzeyinde oluşan sıcaklığın alt katmanlara etki etmediği görülmüştür.

Hava sıcaklığının ve güneş ışınımının artmaya başladığı Mayıs ayından itibaren çatı sistemindeki katman sıcaklıklarında belirgin bir değişim gözlenmiştir. Referans çatının katmanları bu değişimden belirgin bir biçimde etkilenerek, en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Yetiştirme ortamındaki nem değerinin azalmasıyla, bu katmanda belirgin bir sıcaklık artışı tespit edilmiştir. Çatı yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımı incelendiğinde, hava sıcaklığındaki değişimlerin yüzey sıcaklıklarına olan doğrudan etkisi görülebilmektedir.

Ölçüm yapılan dönem boyunca çatı sistemlerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin yardımıyla, her iki çatı sistemiyle ilgili bazı sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. Bunlar;

- Yeşil çatı katmanlarının oluşturduğu ısı yalıtımı, yapı yüzey sıcaklığını ve buna bağlı olarak, yapının iç mekan sıcaklığını dış ortam şartlarından korumaktadır.
- Yeşil çatının altında bulunan yapı yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları daha dengeliyken, referans çatının altında bulunan yapısal yüzeydeki değerler daha değişkendir. Aşırı ısınma ve soğuma olayları referans çatıda daha sık görülmektedir.
- Hava sıcaklığının 5°C'nin altına düştüğü aylarda, referans çatının yüzey sıcaklığı en düşük değere ulaşmaktadır. Sıcaklık arttıkça yeşil çatının yüzey sıcaklığının artım hızı, referans çatıya göre daha düşüktür.
- Yeşil çatı yüzeyinde oluşan değişimler, yeşil çatının altında bulunan katmanlara yansımamaktadır. Bu sayede, yetiştirme ortamının altındaki katmanlar durağan bir sıcaklık dağılımına sahip olmuşlardır.
- Yapı yüzeyleri ve bu yüzeylerdeki bileşenler (su yalıtımı, ısı yalıtımı vb.) yeşil çatı ile kaplandıklarında, değişken iklim koşullarından korunmaktadırlar. Su yalıtımının esnekliğini koruyabilmesi ve su sızdırmazlığının sürekliliği, bu katmanın dış etkilerden korunmasıyla artacaktır.
- Her iki çatı sisteminde, yansıtıcılık özellikleri açısından belirgin fark bulunmamıştır. Referans çatıda kullanılan membranın da yeşil renkli olması bu

konuda etkili olmuştur. Ancak yansıma değerleri benzer olmasına karşın, sıcaklık özellikleri belirgin farklar ortaya çıkarmıştır.

- Elde edilen değerler incelendiğinde, yeşil çatıyla kaplı olan yüzeyler, yapı çevresinde mikroklimatik bir etki yaratmakta ve gelen güneş ışınlarını soğurarak yapının çevresinde daha serin ortamlar oluşmasına neden olmaktadır.
- Bitkilerin çatıyı kaplama oranı, yeşil çatının yüzey sıcaklığı ve yansıma değerlerinde farklılıklar oluşturmuştur.
- Çatı sistemlerinin yüzey sıcaklıkları ile en alt katman sıcaklıkları karşılaştırıldığında, yüzeyde oluşan sıcaklığın yapı yüzeyine geçişinin yeşil çatı sistemi tarafından azaltılmıştır.
- Ölçüm dönemi boyunca elde edilen veriler, yeşil çatıların üzerinde bulundukları yapıya, ortalama %44'e varan oranda ısı yalıtımı sağladığını ortaya çıkarmıştır.
- Tez çalışmasında, hava sıcaklığının düşük olduğu aylarda, yeşil çatının altında bulunan odanın referans çatının altında bulunan odaya göre 0,5 – 2°C daha sıcak, hava sıcaklığının arttığı aylarda ise, yeşil çatının altında bulunan oda sıcaklığının referans çatıya göre 0,5 - 1°C daha serin olduğu tespit edilmiştir.
- Oda sıcaklıkları arasında elde edilen farkın anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla, normal dağılıma sahip olmayan veri gruplarına Mann-Whitney U Testi uygulanmıştır. Ancak %95 güven düzeyinde oda sıcaklıkları arasında anlamlı bir fark oluşmadığı, dolayısıyla da her iki çatı sisteminin iç mekana belirgin bir ısı yalıtımı sağlayamadığı ortaya çıkmıştır.
- İç mekan sıcaklıklarında belirgin bir farklılığın oluşmamasında, çatının boyutunun, yapım tipinin, ısı yalıtım sisteminin ve çatı levhasının kalınlığının etkisinin olduğu tahmin edilmektedir. Ancak elde edilen 1-2°C'lik farklılıkların büyük ölçekteki yapıların ısıtma ve soğutma maliyetlerinin düşürülmesi ve enerji tasarrufu sağlanması açısından önemli değerler olduğu düşünülmektedir.
- Oda sıcaklıklarının yakın sıcaklık değerlerde ölçülmesinin sebepleri farklı nedenlere bağlı olabilmektedir. Çatının yapım tipi, çatı tabyasının kalınlığı, çatının yüzey alanı ve yapının ısı yalıtım özelliklerinin bu duruma etki ettiği tahmin edilmektedir.
- Yağış miktarının yakın değerlerde seyrettiği aylarda bazı farklılaşmalar göze çarpmaktadır. Ardışık yağışsız dönemlerde hava sıcaklığının da etkisiyle

yetiştirme ortamındaki evaporasyon artmaktadır. Bu durum yeşil çatının yetiştirme ortamının daha fazla ısınmasına yol açmaktadır.

- Yetiştirme ortamında nem içeriği azaldığında, çatının yetiştirme ortamı yapısal bir yüzey gibi davranarak keskin sıcaklık dalgalanmaları yaşamaktadır.
- Ölçüm dönemi içerisinde, çatı sistemlerinin yansıtıcılık (albedo) değerlerinin çatı sistemlerinde oluşan sıcaklık değerlerine bir etkisinin olduğunu söylemek güçtür.
- Yeşil çatı sistemleri karasallığı azaltmada önemli bir etkindir.

Dünyada yapılan akademik çalışmalar yeşil çatı sistemlerinin kentlerdeki **yüzeysel akışı** azaltmada belirgin rolleri olduğunu ortaya koymaktadır. Gregorie ve Clausen'in (2011) yaptıkları araştırma, %75 oranında genişletilmiş 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 diğ. (2005b), ABD Michigan ikliminde yeşil çatıların çatı üzerine gelen yağışın %80'den fazlasını tutabilme özelliğini 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 diğ. (2008) gerçekleştirmiş olduğu modelleme çalışması, yeşil çatı sistemlerinin $2,54 \text{ mm/m}^2$ 'den daha düşük yağışlarda oldukça verimli sistemler olduğunu ve bu miktardan daha düşük yağışlarda yüzeysel akışın oluşmadığını ortaya koymuştur. Carter ve Rasmussen (2006) ABD Georgia Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri çalışmada yeşil çatı sistemlerinin $2,54 \text{ mm/m}^2$ 'den düşük yağışlarda, çatı yüzeyine gelen yağışın %90'ını, $7,62 \text{ mm/m}^2$ 'den büyük yağışlarda ise, bu yağışların %50'sini tutabilme özelliğini tespit etmişlerdir.

Mentens ve diğ. (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.

Tez çalışmasında referans çatı olarak tanımlanan geleneksel çatı sistemleri açısından bir değerlendirme yapıldığında, Berhage ve diğ. (2009) Pennsylvania'daki yeşil çatı çalışmasında 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.

Berhage ve diğ. (2009) yeşil çatı sistemlerinin soğuk aylardaki su tutma değerlerinin sıcak aylara göre daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Bunun en önemli nedeni yetiştirme ortamındaki nem varlığının düşük olmasıdır.

Gregorie ve Clausen (2011) ile Dunnett ve diğ. (2008) araştırmalarında kullanmış oldukları yetiştirme ortamı derinlikleri, çalışmada kullanılan yetiştirme ortamından daha derindir. Ayrıca bu yetiştirme ortamları karakter olarak tez çalışmasındaki 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.

Tez çalışmasında, araştırma sahasının bulunduğu konum dünyada yapılan çalışmaların bulunduğu iklimsel özelliklerle çeşitli farklılıklara sahip olsa da, elde edilen sonuçlar yakın değerlere sahiptir. Tez çalışması sırasında elde edilen verilerle ilgili genel bir değerlendirme yapıldığında, yeşil çatı sistemlerinin İstanbul Bahçeköy iklim şartlarında yüzeysel akış özellikleri ilgili bazı sonuçlara ulaşmak mümkün olabilmektedir. Bunlar;

- Yağış başladığı andan itibaren, yeşil çatılar yetiştirme ortamlarındaki nem durumuna bağlı olarak yüzeysel akışa geçecek ya da çatıdan drenaj ortamına iletilecek su miktarını 1 ile 23 saat arasında geciktirebilmektedirler.
- Yeşil çatılar, geleneksel çatı malzemeleriyle kaplı çatılardan tahliye edilen su miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Yetiştirme ortamı ve diğer katmanlardaki su içeriğine bağlı olarak, yeşil çatılar yüzeysel akışa geçecek su miktarını %20 - %100 oranında azaltmakta ya da geciktirmektedirler.
- Yeşil çatılar büyük yağışlarda tahliye edilen su miktarını önemli bir biçimde azaltamamış ancak yağışın drenaj sistemine geciktirilerek verilmesine yardımcı olmuşlardır.
- Çalışmada kullanılan yeşil çatı sistemi yetiştirme ortamı şartlarına ve yağış tipine bağlı olarak 4 mm/m^2 'den küçük yağışlarda yüzeysel akış oluşmasını engellemiş, daha büyük yağışlarda ise çatı sisteminden tahliye olan su miktarının yüzeysel akışa geçmesini geciktirmiştir.

Yaz aylarında yetiştirme ortamındaki nem oranının önemli bir biçimde azalması ile birlikte, çatı yüzeyine gelen yağışların toprak nemi üzerindeki etkisi ve yeşil çatının su depolama kapasitesi hakkında fikir edinilmiştir. Araştırma sırasında kullanılan ekstensif yeşil çatı sisteminin ve yetiştirme ortamı olarak kullanılan tuğla, kiremit kırığı, pomza ve organik madde karışımının ürün kataloğunda belirtilen toplam su depolama değeri $20 - 30 \text{ lt./m}^2$ 'dir. Yaz aylarında kurak dönemler sonrasında oluşan şiddetli yağışlar sırasında elde edilen ölçümler sonucunda;

- Su haznelerinde bulunan seviye sensörleri ile yapılan ölçümlerde, yağış sırasında su kütlesindeki yükselmenin başladığı andan önceki yağış miktarı belirlenerek, yüzeysel akışa geçmeyen su miktarı belirlenmektedir.
- 38 günlük ardıışık yağışsız dönemin ardından 11 Ağustos 2011 tarihinde ölçülen $24,2 \text{ mm/m}^2$ yağışta, yeşil çatı sistemi bu yağışın 20 mm/m^2 yağışı bünyesinde tutmuştur. Bu rakam $10,2 \text{ m}^2$ 'lik çatı yüzeyi de dikkate alındığında 204 mm^3 'lik bir su kütlesine denk gelmektedir. Bu değer 204 kg su ya da 204 lt. suya denktir.
- Benzer ölçümler 30 Eylül 2011 tarihinde yapılmış, yeşil çatı sistemi $22,1 \text{ mm/m}^2$ yağışın $17,5 \text{ mm/m}^2$ 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 geciktirebilmektedir.

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 çatı sistemlerinden elde edilen pH değerleri, yeşil çatı sisteminin yüzeysel akışa geçen suyun pH değerini dengelemek konusunda bir etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır.

Bitkisel gelişim açısından genel bir değerlendirme yapıldığında, tez çalışması sırasında bitkilerin çatıyı kaplama oranı çalışmanın başında %40-45 oranındayken, 1 yıllık dönemde %80'in üzerine çıkmıştır. Benzer bir biçimde Teemusk ve Mander'in (2009) yapmış olduğu çalışmada ilk dönemde bitkilerin çatıyı kaplama oranı çalışmanın başlangıcında %45 olarak kaydedilmiş, çalışmanın sonlarında ise %80'in üzerine çıkmıştır. Bitkilerin çatıyı kaplama oranı arttıkça, yeşil çatının yüzey sıcaklığındaki azalma da artmış ve bitkilerin yüzeyde oluşan sıcaklığı düşürme özellikleri tespit edilmiştir.

Durhman ve Rowe (2007) tarafından yapılan araştırmada, yetiştirme ortamının derinliğinin artması, yetiştirme ortamının su tutma oranının artmasına, bitki köklerinin sıcaklık dalgalanmalarından korunmasına ve bitkiler için geniş dikey bir gelişme alanı oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Getter ve Rowe (2008) yeşil çatı sistemlerinde en düşük yetiştirme ortamı kalınlığını 7 cm olarak önermektedir. Getter ve Rowe (2006), 10 cm'den daha sıkı yetiştirme ortamlarına sahip ekstensif yeşil çatı sistemlerinde, bitki seçimindeki en önemli kriterin bitkilerin kuraklığa dayanıklılığı olduğunu

belirtmektedir. Ekstensif sistemlerde sulama sistemi bulunmaması nedeniyle, bitkiler ancak yağış oluştuğunda su ihtiyaçlarını karşılayabilmektedirler.

Tez çalışmasında, yeşil çatı sistemi üzerinde kullanılan bitkilerin su emme güçleri ya da transpirasyon değerleri ile ilgili olarak, literatür taramasında ayrıntılı bir bilgiye ulaşılamamıştır. Ancak ölçüm dönemi boyunca yapılan gözlemler, bitkilerin hayatta kaldıklarını göstermiş, çevreden çeşitli yollarla gelen tohum ve bitki parçalarının kendiliğinden çatı sistemine dahil oldukları görülmüştür. İlkbahar ve sonbahar aylarında, iklimsel koşulların (yağış, sıcaklık vb.) etkisiyle, bitkilerin çatı yüzeyini kaplama oranında belirgin artışlar gözlenmiştir. Ayrıca, ilkbahar aylarında vejetasyon döneminin de etkisiyle, çevreden gelen yabancı türler çatı yüzeyinde yayılım göstermektedir. Kış ve yaz aylarında bitkilerin çatıyı kaplama oranı azalmaktadır. Bu durum estetik açıdan olumsuz bir görüntü oluşturmakla birlikte, bitkilerin gölgeleme etkisinin azalmasıyla özellikle yaz aylarında çatı yüzeyinin sıcaklığının artmasına neden olmaktadır.

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. Ancak yeşil çatı sisteminin alt katmanlarında (drenaj levhası ve su tutucu keçe) birikmiş olan su miktarı ve bu suyun buharlaşması ile ilgili bir ölçüm yapılmamıştır. Yapılan gözlemlerde, bitkilerin CAM metabolizmalarını kullanarak hayatta kalmalarının yanında, çatı sisteminde depolanan ve hava sıcaklığıyla buharlaşan sudan da faydalandıkları görülmüştür. Çalışma sırasında yetiştirme ortamındaki nem miktarına, yağış haricinde etki eden çevresel etmenler, yetiştirme ortamındaki sıcaklık ve nem değerlerini de etkilemektedir. Bu faktörler; yetiştirme ortamının yapı yüzeyinde ve yer seviyesinden 3 m yukarıda bulunması, toprak tabakasıyla bağının bulunmaması, yetiştirme ortamının derinliği, sık yetiştirme ortamında evaporasyonun daha şiddetli olması, rüzgar etkileri ve atmosferdeki nem açığı olarak açıklanabilir.

Çalışmada kullanılan yetiştirme ortamı 50 -55 mm kalınlığında, yeşil çatı sistemleri için özel olarak geliştirilmiş bir karışımdır. Çalışmada seçilen bitkiler, uluslararası ölçekte yapılan uygulamalar ve deneme sahalarından elde edilen bulgular sonucu

belirlenmiştir(Durhman, A. ve Rowe, D.B., 2007; Getter, K.L. ve Rowe, B.D., 2008; VanWoert N.D. ve diğ., 2005b).

Durhman ve Rowe (2007), ABD Michigan iklim şartlarında 2,5 – 7,5 cm. arasında değişen yetiştirme ortamlarında, 25 bitki türünü denemiştir. 25 bitki türünden, %47'si en derin yetiştirme ortamı olan 7,5 cm'lik yetiştirme ortamında hayatta kalabilmiştir. Yapılan araştırmada, karasal iklime sahip ABD Michigan eyaletinde kullanılması tavsiye edilen bitki türleri *Phedimus spurius*, *Sedum acre*, *Sedum album*, *Sedum midden- dorffianum*, *Sedum reflexum*, *Sedum sediforme* ve *Sedum spurium* olarak belirlenmiştir. Getter ve Rowe (2008) ABD Michigan iklim koşullarında çoğu bitki türünün 7 cm derinliğindeki yetiştirme ortamında, 4 cm derinliğindeki yetiştirme ortamına oranla çok daha iyi bir gelişme gösterdiğini belirlemiştir. Farklı yetiştirme ortamı derinliklerinde en iyi gelişmeyi *Sedum sarmentosum* göstermiştir. Diğer önerilen türler ise, *Sedum floriferum*, *Sedum stefco* ve *Sedum spurium* 'John Creech' olarak belirlenmiştir. Oldukça sığ bir yetiştirme ortamına ihtiyaç duyulduğunda ise, *Sedum sarmentosum* ve *Sedum stefco*'nun çatı yüzeyini en iyi şekilde kaplayacak türler olduğu belirlenmiştir.

Tez çalışmasında, belirlenen türlerin dünyadaki birçok bilimsel araştırmada denenmiş türler olduğu görülmektedir. Literatür taramasında yeşil çatı sistemlerinde kullanılacak bitki türleri ile ilgili araştırmalarla ilgili elde edilen bulgular, tez çalışmasında değerlendirilmiştir. Ancak bitkisel denemelerin yapıldığı deneme sahaları İstanbul'un iklimsel özelliklerine göre bazı farklılıklara sahiptir. Bu nedenle seçilen türlerin tez çalışması sayesinde İstanbul iklim koşullarında gözlenmeleri mümkün olmuştur. Yeşil çatı sistemi üzerinde kullanılan üç *Sedum* türü (*Sedum reflexum*, *Sedum spurium* "Album" ve *Sedum spurium* "Atropurpureum") 382 günlük ölçüm döneminde uzun süreli kurak dönemlere, kar ve don gibi hava şartlarına ve çatı yüzeyinde oluşan ciddi sıcaklık dalgalanmalarına dayanmayı başarmış ve hayatta kalabilmiştir. Çalışmada kullanılan 5 cm kalınlığındaki yetiştirme ortamı, çalışmada seçilen bitkilerin hayatta kalmasını sağlamış ancak özellikle kurak dönemlerde bu ortamın su kaybı oldukça hızlı gerçekleşmiştir.

Dünyadaki akademik çalışmalar, yeşil çatı sistemlerinin çevresel yararlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşırken, diğer bir taraftan da bu araştırma sahalarının bulunduğu bölgelerin iklim koşullarına uygun bitki türlerini de belirleme amacını taşımaktadırlar. Ülkemizde doğal olarak yetişen bitki türlerinin yeşil çatı sistemlerine uygunluğunun araştırılması ve ülkemize özgü çatı bitkilendirmeleri oluşturulması günümüz koşullarında önem kazanmaktadır.

Çatı sisteminden elde edilen veriler, kent ortamındaki bir yeşil çatının rolünün belirlenebilmesi açısından önem taşımaktadır. Son yıllarda küresel ısınma ile ilgili gelişen kaygılar, yeşil bina kriterlerinin oluşmasına, ekolojik mimarlık ve sürdürülebilirlik (süreklilik) kavramlarının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Yeşil çatı sistemi, bahsi geçen kavramlarda önemli bir bileşen konumundadır.

Ekosistem içerisinde insan yaşayışının çevreye getirdiği olumsuz etkiler, bu durumda en büyük paya sahip olan yerleşme olgusunun yeniden ele alınmasını sağlamıştır. Son yıllarda ülkemizde ve dünyada yeşil bina değerlendirme kriterleri önem kazanmaya başlamıştır. Dünyadaki birçok ülke kendi ihtiyaçları kapsamında yeşil bina kriterlerini geliştirmiş ya da mevcut bazı kriterleri kendi ülkelerine adapte ederek uygulamaya koymuştur. Dünyadaki yeşil bina değerlendirme kriterleri yerelliği ve sürdürülebilirliği teşvik eden bir yaklaşıma sahiptir.

Başlıca yeşil bina değerlendirme kriterleri arasında, Amerikan Yeşil Bina Konseyi'nin (U.S. Green Building Council – USGBC) LEED sertifikası, Kanada Yeşil Bina Konseyi'nin benzer bir yaklaşımla geliştirdiği LEED Kanada ve Green-Up, 1990 yılında İngiltere'de ortaya çıkan BREEAM sertifikası (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), Japonya'dan CASBEE (Comprehensive Assessment System For Building Environment Efficiency), Finlandiya'dan PROMISE, Fransa'dan HQE, Almanya'dan DGNB, Norveç EcoProfile, Avusturalya'dan GREENSTAR sayılabilir. Genel anlamda bahsi geçen tüm değerlendirme sistemleri bir puanlama sistemine dayanmaktadır ve kriterlere göre verilen puanlar ile yapıların derecelendirilmesi sağlanmaktadır.

Dünyada en güncel değerlendirme kriteri olan LEED programı ele alındığında, yapıyı tasarlayacak ve inşa edecek ekipler, yapım işlemini sürdürülebilirlik ilkesi kapsamında başlangıcından sonuna kadar belgelemelidirler. Bir yapının değerlendirilmesi 6 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; sürdürülebilir yerleşimin geliştirilmesi, su verimliliği, enerji verimliliği, malzeme ve kaynak seçimi, iç mekan kalitesi ve tasarımda yeni teknikler geliştirilmesi olarak belirlenmiştir (Cantor, S. L., 2008). Yeşil çatılar günümüzde bu programda iç mekan kalitesi dışındaki 5 kategoriden puan alabilmekle birlikte, gelecekte bu durumun değişeceği öngörülmektedir.

Ülkemizin kendine özgü bir yeşil bina değerlendirme kriteri bulunmamakla birlikte, son yıllarda dünyadaki sertifika programlarının uygulama olanaklarıyla ilgili belirgin bir artış görülmektedir. Aynı zamanda bu çalışmalar sivil toplum kuruluşlarınca da desteklenmektedir. Ülkemizde konuyla ilgili ÇEDBİK (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği) bu çalışmaları yürütmekte ve desteklemektedir.

Yeşil bina değerlendirme kriterlerine ek olarak kent ve bina ölçeğinde, enerji verimliliğini artırma ve çevreye uyum sağlama amaçlı bölgesel veya yerel programlardan da bahsetmek mümkündür. Yeşil çatı sistemleri konusunda dünyada öncü ülke konumunda olan Almanya'da, yapılan yasal düzenlemeler yardımıyla yeşil çatı kurulumu desteklenmektedir. Örnek olarak, Nordrhein-Westfalen eyaletinde, kişiler yaşadıkları yapılara yeşil çatı sistemi kurmaları halinde, kurdukları yeşil çatı için m² başına 15,00€ destek almaktadırlar. Almanya'nın diğer bölgelerinde de benzer uygulamalar mevcuttur (Snodgrass E.C. ve Snodgrass L.L., 2006).

İstanbul gibi hızla yapılaşan bir kentte, bulunan bina sayısı, İBB (2001) verilerine göre 757,127 adettir. Yapılan araştırmada, İstanbul kentindeki yapı stoğunun mülkiyet ve inşaat yönetmeliklerine uyum konusunda bazı sıkıntıların bulunduğu tespit edilmiştir. İstanbul'da bulunan binaların çatı tiplerinin yeşil çatı sistemlerine uygunluğuyla ilgili olarak herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Kentte kişi başına düşen yeşil alan miktarı İBB (2001) verilerine göre yaklaşık 5 m²'dir. Bu rakam her tip yeşil alanı kapsayacak şekilde (refüj, park, koru, mezarlık vb.) hesaplanmıştır. Halkın verimli ve aktif olarak kullandığı yeşil alanların miktarı ise kişi başına yaklaşık 1,5 – 2 m² kadardır. Avrupa standartlarında ise bu rakam yaklaşık 15m²'dir.

Yeşil alanların yetersizliği bu çalışmanın önemini arttırmaktadır. 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 deneme sahasından elde edilen bazı parametreler beklenen farklılaşmayı göstermemiş olsa da, yeşil çatı sistemlerinin klasik çatı sistemlerine oranla kentsel ölçekte pek çok faydalarının olduğunu söylemek mümkündür. 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.

Yeşil çatı sistemlerinin doğal bir ekosistemin yerini alması mümkün değildir. Ancak ekosistemde yer almayan yapay bir yüzeyin yeşil çatı sistemleri sayesinde doğaya uygun duruma getirilmesi kent ekolojisi açısından önem taşımaktadır. Kent yüzeyi bu sayede belirgin bir oranda serinletilebilmekte ve suyun etkin kullanımı sağlanabilmektedir. Ayrıca bitkilerle kaplı çatı yüzeyleri, kentteki faunaya yaşam ortamı sağlamaktadır.

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.

KAYNAKLAR

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.

ANONİM, 2000, *Planning Guide “The Green Roof”* 6th edition, ZinCo GmBh, Unterensingen.

ANONİM, 2001, *Sayılarla İstanbul*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Kültür A.Ş. Yayınları, İstanbul.

ANONİM, 2003, *Protecting water quality from urban runoff*, US EPA 841- F-03-003. USEPA, Washington, DC.

ANONİM, 2003, *BCIT (British Columbia Institute Of Technology) Green Roof Research Program Phase 1*, BCIT Green Roof Research Facility, <http://commons.bcit.ca/greenroof/infrastructure.html#facility> [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2008].

ANONİM, 2004, Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Bahçeköy Meteoroloji İstasyonu 1974 – 2004 yılları meteorolojik ölçüm verileri, İstanbul.

ANONİM, 2005, *Binyılın Ekosistem Değerlendirme Kurulu Bildirisi*, Birleşmiş Milletler.

ANONİM, 2006, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, World Meteorological Organization Commission for Instruments and Methods of Observation (WMO/CIMO), Preliminary seventh edition.

ANONİM, 2006, *Final Report of Evaluation of an Extensive Greenroof*, Toronto and Region Conservation Authority , York University, Toronto, Ontario.

ANONİM, 2011, *Heat Island Impacts* [online], Environment Protection Agency (US EPA), <http://www.epa.gov/heatisld/impacts/index.htm> [Ziyaret Tarihi: 7 Şubat 2012].

ANONİM, 2011a, *What is a Passive House?* [online], Feist, Passive House Institute, Darmstadt, http://www.passivehouse.com/07_eng/index_e.html [Ziyaret Tarihi: 5 Ocak 2012].

ANONİM, 2011b, *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].

ANONİM, 2011c, Google Earth.

ANONİM, 2011d, *Lufft Instruments Soil Humidity Probe*, <http://www.lufftusa.com/tools/item.cfm?code=soilhumidityprobe&catid=519> [Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2010].

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.

BASS, B., KRAYENHOFF, E.S., MARTILLI, A., STULL, R.B., AULD, H., 2003, The impact of green roofs on Toronto's urban heat island. *Proceedings of the First North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*; 20–30 May, 292–304, Chicago, ABD.

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.

CANTOR, S.L., 2008, *Green roofs in sustainable landscape design*, W. W. Norton & Company, New York, ISBN 978-0-393-73168-2.

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 (2006): 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.

ÇEPEL, N., 1993, *Toprak-Bitki-Su İlişkileri*, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İstanbul, ISBN 975-404-320-5.

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.

DURHMAN, A.K., ROWE D.B., 2007, Effect of substrate depth on initial growth, coverage and survival of 25 succulent green roof plant taxa, *HortScience* 42:3: 588-595.

EKŞİ, M., 2012, İstanbul'daki Başlıca Çatı Bahçelerinin Yapım Esasları Açısından Değerlendirilmesi, 2012, *Journal of the Faculty of Forestry* 62 (1): 149-157.

EKŞİ, M., UZUN, A., 2012, Bitkilendirilmiş Bir Çatı Sisteminin Nicel Değerlendirilmesi: İÜ Orman Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü Peyzaj Teknikleri Anabilim Dalı Yeşil Çatı Araştırma Projesi Örneği, 6. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 12 – 13 Nisan, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Görükle Kampüsü – Bursa.

EZBER, Y., SEN, Ö.L., KINDAP, T., KARACA, M., 2007, Climatic effects of urbanization in Istanbul: 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, D.B., 2006 The role of extensive green roofs in sustainable development, *HortScience* 41:1276-1285.

GETTER, K.L., ROWE, B.D., 2008, Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosyst (2008)* 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>.

HILTEN, R.N., LAWRENCE, T.M., TOLLNER, E.W., 2008, Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D, *Soil Conservation*, 288- 293.

JIM, C.Y., HONGMING, H., 2010, Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem, *Ecological Engineering* 36:8: 1052-1063 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.018>.

KIRSCHSTEIN, C., 1997, Die du Sedum-arten, abgeleitet aus der bedeutung der wurzelsaugspannung-teil 1, *Stadt und Grun* 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, ISSN: 1541-7115.

KUMAR A.R., KAUSHIK, S. C., 2005, Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings, *Building and Environment* 40: 1505-1511.

LASSALLE, F., 1998, Wirkung von trockenstreb auf xerophile pflanzen, *Stadt und Grün* 47(6):437–443

LAZZARIN, R.M., CASTELLOTTI, F., BUSATO, F., 2005, Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, *Energy and Buildings*, 37:12: 1260-1267.

LIU, K., 2004. Sustainable Building Envelope – Garden Roof System Performance, *RCI Building Envelope Symposium*, New Orleans, L.A., 2004:1-14.

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), *Ann. Bot.* 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.

MORAN, A., HUNT, B., JENNINGS, G., 2003, A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth, *World Water Congress*, 118:3:335-335.

NGAN, G., 2004, Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design, *Landscape Architecture Canada Foundation*, Kanada.

NIACHOU, A., PAPAKONSTANTINO, 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.

OSMUNDSON, T., 1999, *Roof gardens: history, design and construction*, Norton Company, 1999, New York, ISBN: 0-393-73012-3.

RANSON, S.L., Thomas, M., 1960, Crassulacean acid metabolism, *Annu. Rev. Plant Physiol.* 11:81-110.

SAILOR, D. J., 2008, A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings*, 40, 1466-1478.

SANTAMOURIS, M., PAVLOU, C., DOUKAS, P., MIHALAKAKOU, G., SYNNEFA, A., HATZIBIROS, A., PATARGIAS, P., 2007, Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, *Energy* 32:9:1781-1788.

SAYED, O.H., 2001, Crassulacean acid metabolism 1975–2000, a check list, *Photosynthetica* 39, 339–352.

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., KALAVROUZOTIS, 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 Physiol.* 81: 678-680.

UZUN, A., 2002, *Çatı Bahçesi Ders Notları*, İstanbul [Yayınlanmamış 75 Daktilo sayfası].

VANWOERT, N. D., ROWE, D.B., ANDRESEN, J.A., RUGH C.L., XIAO, L., 2005a, Watering regime and green roof substrate design affect sedum plant growth, *HortScience* 40: 3: 659-664.

VANWOERT, N. D., ROWE, D.B., ANDRESEN, J.A., RUGH, C.L., FERNANDEZ, R.T., XIAO, L., 2005b, 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, J., 1960, Der diurnale saurerhythmus, *Encyclopedia of Plant Physiology*, Springer-Verlag, 12:809-89, Berlin.

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

WONG, N.H., CHEN, Y., ONG, C.L., SIA, A., 2003a, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Building and Environment* 38:261–270.

WONG, N.H., FEN, S., WONG, R., LENG, C., SIA, A., 2003b, Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore, *Building and Environment* 38: 499 - 509.

EKLER

7.1. EK - 1 BİTKİSEL DOKU

Ek-7.1.1 - *Sedum reflexum* çiçek açarken – 10 Haziran 2011

Ek-7.1.2 - *Sedum reflexum* – 20 Nisan 2012

Ek-7.1.3 - *Sedum spurium* "Album" – 17 Haziran 2011

Ek-7.1.4 - *Sedum spurium* "Album" – 15 Temmuz 2011

Ek-7.1.5 - *Sedum spurium* "Atropurpureum" – 10 Kasım 2011

Ek-7.1.6 - *Sedum spurium* "Atropurpureum" ve bitkisel doku – 20 Nisan 2012

7.2 EK - 2 ÖLÇÜM VE DEĞERLENDİRME

Ek-7.2.1 - 3 Eksenli Ultrasonik Anemometre

Ek-7.2.2 - Çatı yüzeyinde bulunan piranometreler ve kızılötesi termometreler

Ek-7.2.3 - Çatı yüzeyinde bulunan piranometreler

Ek-7.2.4 - Isı akısı ölçüm plakaları ve termoçiftler

Ek-7.2.5 - Devrilen kovalı yağışölçer

Ek-7.2.6 - Veri kayıt sistemi

Ek-7.2.7 - Su haznesi

Ek-7.2.8 - Yağış sırasında çatı sistemlerinden tahliye edilen su miktarı – 9 Mart 2011

Ek-7.2.9 - Seviye sensörü

Ek-7.2.10 - Toprak nemi kayıt cihazı

7.3 EK - 3 ÇATI YÜZEYİNDE OLUŞAN DÖNEMSEL DEĞİŞİMLER

Ek-7.3.1 - Yeşil çatı görünümü - 18 Ekim 2010

Ek-7.3.2 - Yeşil çatı görünümü - 27 Aralık 2010

Ek-7.3.3 - Yeşil çatı görünümü - 30 Mayıs 2011

Ek-7.3.4 - Yeşil çatı görünümü - 4 Temmuz 2011

Ek-7.3.5 - Yeşil çatı görünümü - 18 Ekim 2011

Ek-7.3.6 - Yeşil çatı görünümü – 20 Nisan 2012

7.1. EK - 1 BİTKİSEL DOKU



Ek - 7.1.1 - *Sedum reflexum* çiçek açarken – 10 Haziran 2011



Ek - 7.1.2 - *Sedum reflexum* – 20 Nisan 2012



Ek - 7.1.3 - *Sedum spurium* "Album" – 17 Haziran 2011



Ek - 7.1.4 - *Sedum spurium* "Album" – 15 Temmuz 2011



Ek - 7.1.5 - *Sedum spurium* "Atropurpureum" – 10 Kasım 2011



Ek-7.1.6 - *Sedum spurium* "Atropurpureum" ve bitkisel doku – 20 Nisan 2012

7.2 EK - 2 ÖLÇÜM VE DEĞERLENDİRME



Ek-7.2.1 - 3 Eksenli Ultrasonik Anemometre



Ek-7.2.2 - Çatı yüzeyinde bulunan piranometreler ve kızılötesi termometreler



Ek-7.2.3 - Çatı yüzeyinde bulunan piranometreler



Ek-7.2.4 - Isı akısı ölçüm plakaları ve termočiftler



Ek-7.2.5 - Devrilen kovalı yağışölçer



Ek-7.2.6 - Veri kayıt sistemi



Ek-7.2.7 - Su haznesi



Ek-7.2.8 - Yağış sırasında çatı sistemlerinden tahliye edilen su miktarı (Yeşil çatı solda, referans çatı sağda) – 9 Mart 2011



Ek-7.2.9 - Seviye sensörü



Ek-7.2.10 - Toprak nemi kayıt cihazı

7.3 EK - 3 ÇATI YÜZEYİNDE OLUŞAN DÖNEMSEL DEĞİŞİMLER



Ek-7.3.1 - Yeşil çatı görünümü - 18 Ekim 2010



Ek-7.3.2 - Yeşil çatı görünümü - 27 Aralık 2010



Ek-7.3.3 - Yeşil çatı görünümü - 30 Mayıs 2011



Ek-7.3.4 - Yeşil çatı görünümü - 4 Temmuz 2011



Ek-7.3.5 - Yeşil çatı görünümü - 18 Ekim 2011



Ek-7.3.6 - Yeşil çatı görünümü – 20 Nisan 2012