

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**PAYLAŞTIRILMIŞ ENTROPİ YÖNTEMİ İLE AKIM
PROJEKSİYONLARININ HİDROLOJİK KURAKLIK ANALİZİ**

HATİCE ALTUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Umut OKKAN (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Erhan AKKUZZU
 Doç. Dr. Ebru ERİŞ

BALIKESİR, OCAK - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Paylaştırılmış Entropi Yöntemi ile Akım Projeksiyonlarının Hidrolojik Kuraklık Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hatice ALTUN

ÖZET

PAYLAŞTIRILMIŞ ENTROPİ YÖNTEMİ İLE AKIM PROJEKSİYONLARININ HİDROLOJİK KURAKLIK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATİCE ALTUN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. UMUT OKKAN)

BALIKESİR, OCAK - 2023

Yüzey ve yüzey altı akımlarındaki yetersizlik olarak tanımlanabilen hidrolojik kuraklık kayda değer ekolojik sorunları tetikleyen doğal bir afettir. Hidrolojik kuraklığın şiddetini ve frekansını belirlemede en sık kullanılan yaklaşım standardize akım indeksi (SRI) iken, rastgele karakterdeki hidrolojik süreçlerden bilgi edinimine dayanan entropi yönteminin kuraklık ölçütü olarak kullanımı nispeten yenidir. Tez çalışmasında, bunlar içinden paylaştırılmış entropi (PE) yaklaşımın Gördes Baraj Havzasına ait akım projeksiyonlarına uyarlanması ve süreç hakkında kazanılan bilginin zaman serisi olarak irdelenmesi hedeflenmiş ve sonuçlar SRI ile elde edilenlerle kıyaslanmıştır. İki adet emisyon senaryosu altında çalıştırılan HADGEM2-ES iklim modeli çıktılarının 2021-2050 dönemi yağış ve sıcaklıkları için istatistiksel ölçek küçültmesi ve yanlılık düzeltilmesi yapıldıktan sonra, kavramsal bir hidrolojik modelle akarsu akımları türetilmiştir. Kuraklık şiddetlerine ait sınıflandırmalara bakıldığında, PE'nin standart yöntem olan SRI ile uyumlu olmadığı görülmüş olup, yöntemin uzun vadeli hidrolojik kuraklık değerlendirmesinde uygulanabilirliği güven arz etmemektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Hidrolojik kuraklık, iklim değişikliği, ölçek indirgeme, entropi

Bilim Kod / Kodları : 91106/90313

Sayfa Sayısı : 60

ABSTRACT

HYDROLOGICAL DROUGHT ANALYSIS OF STREAMFLOW PROJECTIONS USING APPORTIONMENT ENTROPY

MSC THESIS

HATİCE ALTUN

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. UMUT OKKAN)

BALIKESİR, JANUARY - 2023

Hydrological drought, which is defined as the lack of streamflows and subsurface flows, is a natural calamity that might bring about significant ecological issues. While the standardized runoff index is the most frequent way for determining the severity and frequency of hydrological drought, the entropy method, which is based on the acquisition of information from hydrological processes, is a relatively recent method for characterizing that kind of drought. The objective of the thesis study was to adapt the apportionment entropy (AE) approach to the streamflow projections of the Gordes watershed and to investigate the information collected about the process as a time series, and then the analyses were compared to those produced by SRI. Streamflows were projected using a conceptual hydrological model following statistical downscaling and bias correction of precipitation and temperature outputs from the HADGEM2-ES global climate model under two emission scenarios for the period 2021-2050. Examining the classifications of hydrological drought intensities reveals that the AE is incompatible with the standard approach, SRI, and that the utility of this method in the long-term hydrological drought evaluation might be unreliable.

KEYWORDS: Hydrological drought, climate change, downscaling, entropy

Science Code / Codes : 91106/90313

Page Number : 60

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ	vi
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Amaç ve Kapsam	3
2. YÖNTEM.....	5
2.1 Uygulanan İstatistiksel Ölçek İndirgeme Stratejisi.....	5
2.2 Yapay Sinir Ağları	8
2.2.1 Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları (FFNN).....	8
2.2.2 Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları (RBF).....	11
2.3 Akım Projeksiyonlarının Elde Edilmesi	13
2.4 Kullanılan Kuraklık İndisleri	17
2.4.1 Standardize Akım İndeksi (SRI)	17
2.4.2 Paylaştırılmış Entropi (PE) Yaklaşımı	18
3. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER.....	20
3.1 HadGEM2-ES İklim Modeli ve NCEP Re Analiz Verileri	22
3.2 Adımsal (Kademeli) Regresyon.....	25
4. BULGULAR.....	27
4.1 Ölçek İndirgeme Modelinin Kalibrasyon ve Validasyon Performansları.....	27
4.2 Hidrolojik Modellerin Kalibrasyon ve Validasyon Performansları.....	36
4.3 Hidro-meteorolojik Projeksiyonların Elde Edilmesi	37
4.4 Kuraklık İndislerinin Performansları	40
5. SONUÇLAR	49
6. KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Farklı iklim senaryoları kapsamındaki GCM çıktılarının istatistiksel ölçek indirgenmesinde izlenecek adımlar	8
Şekil 2.2: Çok katmanlı bir yapar sinir ağı yapısı	9
Şekil 2.3: Yağış-akış modellerinin şematik gösterimleri, modellere ait parametre tanımları ve ilgili hesap adımlar	16
Şekil 3.1: Tez çalışması kapsamında kullanılan havzaya ait konum	21
Şekil 3.2: Adımsal regresyon ile seçilen açıklayıcı tahminleyiciler	24
Şekil 4.1: Gördes havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin kalibrasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı	30-32
Şekil 4.2: Gördes havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin validasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı	33-35
Şekil 4.3: Gördes Havzası HADGEM2-ES senaryo çıktılarının yanlılık düzeltme işlemi öncesi ve sonrası dağılımları: (a) Aralık ayı toplam yağışları için değerlendirme, (b) Temmuz ayı ortalama sıcaklıkları için değerlendirme (obs gözlemleri, corr ve uncorr alt indisleri sırasıyla düzeltilmiş ve düzeltilmemiş varyasyonları göstermektedir. İlk ve ikinci sütun grafikleri sırasıyla referans dönem ve 2021-2050 dönemi ampirik eklenik dağılım fonksiyonu değerleri ile oluşturulmuştur. Son sütundaki gösterimler ise ortalamanın %95 güven aralıklarını temsil etmektedir).	39
Şekil 4.4: Hist senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.....	41
Şekil 4.5: RCP 4.5 senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.....	42
Şekil 4.6: RCP 8.5 senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.....	43
Şekil 4.7: Hist senaryosu için farklı iklim özellikli periyot etkinliklerinin SRI ve PE ölçütlerine göre karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.8: RCP 4.5 senaryosu için farklı iklim özellikli periyot etkinliklerinin SRI ve PE ölçütlerine göre karşılaştırılması	45
Şekil 4.9: RCP 8.5 senaryosu için kurak, normal ve sulak periyot etkinliklerinin SRI ve PE yöntemlerine göre karşılaştırılması.....	46
Şekil 4.10: SRI ve PE yöntemleriyle hesaplanan kurak, normal ve sulak periyotlarının mutlak farklarının senaryolara göre değişimi	47

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: SRI için kuraklık sınıfları	18
Tablo 2.2 Paylaştırılmış entropi tekniğinde elde edilen PE değerinin üst ve alt limitlerine ait kuraklık şiddeti sınıfları	19
Tablo 3.1: İstasyonlara ait detaylı bilgiler	20
Tablo 3.2: Çalışmada değerlendirilen CMIP5 modeli ve buna ilişkin genel bilgiler.....	22
Tablo 4.1: Hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin kalibrasyon ve validasyon performansları	29
Tablo 4.2: Hidrolojik modelin kalibre edilen parametreleri.....	36
Tablo 4.3: BMA ile ağırlıklandırılmış model çıktılarından elde edilen eğitim ve validasyon dönemi performansları.....	36
Tablo 4.4: Gördes Havzası için çeşitli değişkenlerin projeksiyonlarında öngörülen rölatif değişimler (ΔT , ΔP , ΔEP , ΔE_{net} ve ΔQ sırasıyla sıcaklık, yağış, tava buharlaşması, net buharlaşma ve hazneye giriş akımları ortalamalarındaki yüzde değişimleri temsil etmektedir).	38

ÖNSÖZ

Çağımızın ve geleceğimizin sorunu olan kuraklık kavramının araştırılması için ülkemizde gözlenmiş rasatlar kullanılarak uygulanan birçok meteorolojik veya hidrolojik kuraklık indisi mevcuttur. Ancak iklim modelleri altında üretilen projeksiyonların kuraklık indisleri yoluyla ve yardımıyla yorumlanması üzerine oldukça az sayıda ulusal literatür göze çarpmaktadır. Mevcut indisler içerisinden bilgi kuramını esas alan entropinin hidrolojik zaman serilerine uyarlanması ise güncel bir konu olup iklim değişikliği teması içerisinde henüz hiç sorgulanmamıştır. Bu bakımdan ulusal bir literatür açığını kapatacağını umduğumuz bu tez konusu ile kuraklık ve iklim değişikliği gibi güncel konular üzerine çalışan araştırmacılara yol gösterilmesi hedeflenmektedir.

Tez çalışmamın araştırılması, yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında tecrübe ve bilgi birikimiyle bana yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Umut Okkan'a ve bu süreçte benden desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Balıkesir, 2023

Hatice ALTUN

1. GİRİŞ

1.1 Genel

Kuraklık kavramı ekosistemimiz ve yaşam kaynaklarımız üzerinde müthiş bir olumsuz etkiye sahiptir. Ele alınan noktaya göre birçok tanımı bulunan kuraklık kavramı için genel olarak iklim değişikliği etkisiyle küresel ölçekte şiddeti giderek artış gösteren ve yavaş yavaş gelişen bir doğal afet tanımı yapılabilmektedir. Literatürde yer alan birkaç çalışmada farklı disiplinlere göre tanımının değişkenlik gösterebileceği de vurgulanmıştır (Şen, 2009). Fakat genel anlamda yağışlardaki azalmaya karşın hidrolojik dengenin olumsuz etkilenmesine sebep olan doğal afet olarak tanımlanabilir. Tanımı her ne olursa olsun günümüz ve geleceğimiz için göz ardı edilemeyecek bir tehlike olduğu kesindir.

Dünya nüfusunun artması, tabiatın tahrip edilerek ekosistemimizde zarar verilmesi, insan kaynaklı bilinçsiz kullanım ve kirlilik gibi daha fazla eklenebilecek sebeplerden ötürü kuraklığın ve kuraklık hızının artış gösterdiği söylenebilir. Ayrıca yoğun ve kalıcı bir yağış açığının tetiklediği kuraklık, diğer doğal afetlerden daha fazla insanı ve daha geniş alanları etkileyen suyla ilgili en yıkıcı felakettir (Adams vd., 2009; Waseem vd., 2015; Wilhite, 2000). Evapotranspirasyona bağlı artan su talebi ile birlikte yağışların azalması tarımı, ekosistemleri ve hatta insan yaşamını tehdit etmekte (Zargar vd., 2011) ve ciddi sosyoekonomik etkilere yol açmaktadır. Su açığının özelliklerine ve dikkate alınan hidroklima değişkenlerine bağlı olarak, kuraklıklar genel olarak meteorolojik, tarımsal, hidrolojik ve sosyoekonomik olarak kategorize edilebilir (Xu vd., 2015; Lloyd Hughes ve Saunders, 2002; Mishra ve Singh, 2010;). Bir bölgede uzun süre yağış kıtlığı olarak tanımlanan meteorolojik kuraklık, diğer üç kuraklık türü gibi sürekli yağış eksikliğinden kaynaklanabileceğinden, kuraklıkların incelenmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır (Greve ve Seneviratne, 2015; Waseem vd., 2015). Tüm bu sebeplerle birlikte hatta bu sebeplerden ötürü yaşanan iklim değişikliğinin kuraklık üzerinde önemli bir etkisi vardır. Son zamanlardaki şiddetli kuraklık örnekleri olarak 2003 Avrupa (Fink vd., 2004), 2010 Rusya (Dole vd., 2011), 2010 Güneybatı Çin (Yang vd., 2012), 2014 Kaliforniya kuraklıkları (Griffin ve Anchukaitis, 2014), 2014–2015 Hindistan (Zhao ve Dai, 2016) verilebilir.

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, kuraklığın analizi alınabilecek önemler ve su kaynakları yönetimi gibi konular için önem arz etmektedir. Fakat kuraklığı yalnızca yağış ölçümleriyle analiz etmek yetersiz kalabilmektedir. Literatürde çeşitli amaçlar için kuraklık analizi yapan çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalar kapsamında en çok bilinen indeksler Standardize Yağış İndeksi (SPI) (McKee vd., 1993), Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi'dir (Palmer, 1965). Bu indeksler, kuraklığın belirlenmesi, izlenmesi, değerlendirilmesi ve tahmin edilmesine yönelik etkili yaklaşımların geliştirilmesinde ve ayrıca kuraklık dönemlerinde su kaynakları yönetimi konusunda karar verme sürecinde (Prudhomme vd., 2014) kullanılmıştır (Doğan vd., 2012; Heim, 2002; Sheffield vd., 2012; Zhang vd., 2015). Genel olarak, her kuraklık indeksinin kuraklıkları değerlendirmek için kendi avantajları ve dezavantajları var olup bu sebepten ötürü farklı kuraklık indeksleri genellikle değişen etkilere veya uygulamalara ve kuraklık türlerine karşılık gelir (Heim, 2002; Mishra ve Singh, 2010). Bu nedenle, aynı anda veya sırayla meydana gelebilecek ve potansiyel olarak fiziksel, nedensel ilişkilere sahip olabilecek farklı kuraklık türlerini (Mo ve Schemm, 2008) ayırt etmek zordur. Dahası, her bölgenin kendine özgü hidroiklimi ve bölgeden bölgeye oldukça değişken yağış açıklarına neden olan coğrafi koşulları vardır. Bu nedenle kuraklığın tanımı bölgeye özgü olarak düşünülmelidir. Başka bir deyişle kuraklık, bir bölgedeki yağış açığının göreceli ancak mutlak olmayan bir koşuludur. Şu anda kullanılan bu kuraklık indeksleri, yalnızca belirli bir bölgedeki kuraklık durumunun oluşumunu kendi normal durumuyla karşılaştırarak belirleyebilir ve değerlendirebilir, ancak bölgeler arasındaki fark göz önüne alındığında başarısız olabilir. Bununla birlikte, kuraklık oluşumundaki mekansal örüntü ve farklılığın nasıl değerlendirileceği, büyük mekansal ölçeklerde azaltma önlemlerinin geliştirilmesi ve etkili su kaynakları yönetiminin temeli olarak kuraklık çalışmasında bir diğer kritik konudur. Yağışların zamanlaması, yoğunluğu ve süresindeki güçlü bölgesel değişkenlik, evapotranspirasyonun değişkenliği ile birleştiğinde genellikle kuraklıkların zamansal evrimini ve mekansal modelini belirler. Bu nedenle, hidroiklim değişkenlerinin uzay-zaman değişkenliğini anlamak, kuraklığı ve mekansal modelini değerlendirmek için önemlidir. Bununla birlikte, hidroiklim süreci genellikle birbiriyle ilişkili birçok fiziksel faktörün etkisi nedeniyle oldukça karmaşık ve stokastiktir. Karmaşıklık ve rastgelelik iklim değişikliğinin etkisiyle daha da kötüleşmektedir (Carsten vd., 2008; Labat, 2010; Sang vd., 2015). Değişkenliğin belirlenmesi, iklim sistemleri ile coğrafi ve jeomorfik koşullar arasındaki karmaşık bağlantılar nedeniyle karmaşıktır (Ghosh ve Mujumdar, 2007) ve bu durum araştırmacıları hidroiklim değişkenliğinin tespiti ve ilişkilendirilmesi için çeşitli yöntem ve yaklaşımlar

benimsemeye teşvik etmiştir (Koutsoyiannis ve Montanari, 2007). Son zamanlarda, yağış dahil olmak üzere evapotranspirasyon, akış ve boşaltım gibi değişkenlerin uzay-zaman değişkenliğini değerlendirmek, rastgele özelliklerini ölçmek ve diğer yaklaşımların bulgularını hem doğrulamanın hem de genişletmenin bir yolu olarak entropi teorisi kullanılmıştır (Koutsoyiannis ve Montanari, 2007; Hejazi vd., 2008; Singh, 2015; Sang, 2012). Entropi indeksi, yağışların büyüklüğünün, yoğunluğunun ve süresinin (yani sulak veya kurak dönemlerin) rastgeleliği ve homojenliği gibi bir hidroiklim değişkeninin veri kümesinin olasılıksal dağılımını ve istatistiksel özelliklerini tanımlamak için kullanılabilir (Hao ve Singh, 2011; Hong vd., 2015). Bu nedenle entropi, kuraklığı ve hidroiklim verilerine dayalı mekansal dağılımı ölçmek ve değerlendirmek için etkili bir yaklaşım olmaktadır (Bacanlı vd., 2013; Bacanlı vd., 2017; Kawachi vd., 2001; Maruyama vd., 2005; Okkan ve Altun, 2019).

1.2 Amaç ve Kapsam

En çok bilinen yöntemlerden olan SPI'nin akım verilerine uyarlanan versiyonu olan standardize akım indeksi (SRI) ile herhangi bir havzada belirli bir zaman diliminde kurak veya sulak durumlardaki akım anormallikleri tayin edilebilir (McKee vd., 1993; Shukla ve Wood, 2008). Tez çalışması kapsamında SRI ve nispeten daha yeni bir yöntem olan Paylaştırılmış entropi yöntemini akım değişkeni için kullanmak, bu iki yönteme ait sonuçları karşılaştırarak hem yöntemlerin güvenilirliğini sınamak hem de birbiri ile olan ilişkisini değerlendirmektir. Kuraklık analizi yaparken kullanılacak akım projeksiyonlarını elde ederken yağış ve sıcaklık projeksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. İklim değişikliği senaryoları oluşturulurken kaba alansal çözünürlükle çalıştırılan GCM'ler bölgesel iklim değişikliği hakkında tam olarak doğru bilgi vermediği için iklim değişikliği adına bölgesel etkileri değerlendirirken daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlar gerekmektedir. Bu sebeple GCM'lerin bölgesel etkilerini doğru belirleyebilmek için kaba tahminleri yerel ölçeğe indirmeyi amaçlayan stratejiler geliştirilmiştir. (Tatlı vd., 2006; Tripathi vd., 2006; Wilby vd., 2002).

İklim değişikliğine karşı haznelere ait tepkileri inceleyen çeşitli çalışmalar mevcut olmakla birlikte söz konusu çalışmalarda genellikle Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelleri (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) kapsamında küresel iklim modelleri (GCM) kullanılarak farklı emisyon senaryoları altında yağış, sıcaklık ve buharlaşma gibi meteorolojik değişkenler bazında projeksiyonlar hazırlanmakta ve bu projeksiyonlardan

elde edilen tahminler havza özelinde kalibre edilen hidrolojik modeller vasıtasıyla akım tahminlerine dönüştürülmektedir. Projeksiyonu hazırlanan meteorolojik ve hidrolojik tahminler daha sonra hazne işletme çalışmalarına girdi teşkil etmekte ve değişen koşullarda haznenin sulama/içmesuyu taleplerini yerine getirebilme performansları çeşitli indisler (güvenilirlik, narinlik vb.) yardımıyla yorumlanmaktadır. Bu çalışmaların birazı Dünya İklim Araştırma Programı (World Climate Research Programme) kapsamında yürütülen Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Faz 3 (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 3: CMIP3) bünyesindeki GCM'ler ve iklim senaryoları ile gerçekleştirilmiştir (örneğin Brekke vd., 2009; Li vd., 2010; Ashofteh vd., 2013; Mateus ve Tullos 2017). Daha güncel çalışmalar ise temsili konsantrasyon rotaları (Representative Concentration Pathways: RCP) olarak adlandırılan senaryolar altında çalıştırılan CMIP5 iklim modelleri ile yapılmıştır (Masia vd., 2018; Okkan ve Kirdemir, 2018; Ngo vd., 2018; Peres vd., 2020; Nguyen vd., 2020; Chadwick vd., 2021). Tez çalışması kapsamına öncelikle Gördes Havzası için önümüzdeki 30 yıllık dönemi (2021-2050) kapsayacak şekilde farklı HadGEM2-ES ve RCP senaryoları altında aylık ortalama sıcaklık, aylık yağış, buharlaşma ve akım projeksiyonları hazırlanmıştır. Akım projeksiyonlarının elde edilmesi aşamasında dinamik su bütçesi modeli (dynwbm) ve abcde adlı parametrik-ortalananmış kavramsal yağış akış modelleri kullanılmıştır. Bahsi geçen modeller ülkemizdeki havzalarda aynı seyirde giden ve değişen iklim koşulları göz önünde bulundurulduğunda akış tahmini elde etmede yeterli görülen hidrolojik modellerdir. (Okkan, 2015; Okkan ve Kıymaz, 2020; Okkan ve Kirdemir, 2018, 2020). Çalışmada kullanılan yöntemlere ait detaylar Bölüm 2'de, kullanılan havza ve verilere ait bilgiler Bölüm 3'te ve elde edilen tüm sonuçlara ait bulgular Bölüm 4'te sunulmuştur.

2. YÖNTEM

2.1 Uygulanan İstatistiksel Ölçek İndirgeme Stratejisi

Gelecek dönemlerde yaşanması kaçınılmaz görünen iklim değişikliğine ait öngörülerini elde edebilmek amacıyla iklim değişikliği senaryoları oluşturulmakta ve bu senaryolarla etki değerlendirilmeleri yapılmaktadır. Kaba alansal çözünürlükle çalıştırılan GCM'ler bölgesel iklim değişikliği hakkında tam olarak doğru bilgi vermediği için iklim değişikliği adına bölgesel etkileri değerlendirirken daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlar gerekmektedir. Bu sebeple GCM'lerin bölgesel etkilerini doğru belirleyebilmek için kaba tahminleri yerel ölçeğe indirgemeyi amaçlayan stratejiler bulunmuştur (Tatlı vd., 2006; Tripathi vd., 2006; Wilby vd., 2002).

GCM'lerin kaba alansal çözünürlüklü çıktıları yerel ölçeğe indirmek için istatistiksel ve fiziksel tabanlı dinamik olarak iki ayrı ölçek indirgeme (downscaling) yöntemi uygulanmaktadır. Dinamik ölçek indirgeme yöntemi başarılı bir şekilde kullanılsa da sınır şartları küresel ölçekli model çıktıları ile belirlendiği için tahminler tarafsız olmamaktadır. Bu nedenle de belirsizler daha da artış göstermektedir. Ayrıca dinamik modellerle yüksek çözünürlükler elde edilse de uygulanması, kurulum aşamaları ve performanslarının sınanması meşakkatli olup kısa süre içerisinde farklı bölgelere uygulanabilirliği zordur (Okkan ve Fistikoglu, 2012).

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda büyük atmosferik değişkenlerle yerel yüzey değişkenleri arasında sayısal ve istatistiksel bağlantılar geliştirilmesini esas alan istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri de sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca (Trzaska ve Schnarr, 2014) çalışmalarında istatistiksel ölçek indirgeme modellemesinin daha çok GCM' e uygulanabilirliğe sahip olduklarını söylemişlerdir.

Atmosferik klasifikasyon teknikleri, atmosferik üreticiler ve transfer fonksiyonları şeklinde üç çeşit istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi bulunmaktadır (Chen ve Chen, 2001; Chen vd., 2006; Lorenz, 1969; Liao vd., 2004; Katz, 1996; Katz ve Parlange, 1998; Wilby, 1994; Wilks ve Wilby, 1999; Palutikof vd., 2002). Bahsi geçen yöntemlerden bölgesel iklimi simgelediğine inanılan, büyük ölçekteki atmosferik değişkenler ile yerel ölçektekiler arasındaki istatistiksel ilişkinin oluşturulması temeline dayanan dönüşüm (transfer)

fonksiyonları daha sıklıkla kullanılmaktadır (Anandhi vd., 2008; Dibike ve Coulibaly, 2006; Fistikoglu ve Okkan, 2011; Gardner ve Dorling, 1998; Okkan, 2009; Najafi vd., 2011; Murphy, 1999; Schoof vd., 2007; Tripathi vd., 2006).

Çok değişkene sahip doğrusal olan ve doğrusal olmayan regresyon teknikleri, yapay sinir ağları (FFNN), asal bileşen analizi, destek vektör makinaları (DVM) ve gereksizlik indeksi gibi ölçek indirgeme yöntemleri bu alanda kullanılmaktadır (Burger, 1996; Crane ve Hewitson, 1998; von Storch vd., 1993; Fistikoglu ve Okkan, 2011; Landman vd., 2001; Wilby vd., 2003; Anandhi vd., 2008; Okkan, 2009; Karamouz vd., 2009).

Tez çalışması kapsamında yerel ölçekteki aylık toplam yağış (P) değişkeni adına transfer fonksiyonu temelli bir istatistiksel ölçek indirgeme modellemesinin geliştirilmesi tercih edilmiştir. Tercih edilen istatistiksel ölçek indirgeme modellemesinin oluşturulması sırasında çok katmanlı yapay sinir ağı (FFNN) modeli ve radyal tabanlı sinir ağı (RBF) modeli uygulanmıştır. Modellerin kurulumu, kalibrasyonu (eğitim) ve sınanması için gerekli adımları inceleyebileceğiniz bilgiler literatürde bulunmaktadır (Lin vd., 2004; Fistikoglu ve Okkan, 2011; Okkan ve Kirdemir, 2016). Kalibrasyonda kullanılan dönem için hata kareler ortalamasının kare kökü olan RMSE minimizasyonunu karşılayan model yapı ve parametreleri (ağırlıklar ve bias terimleri vb.) tayin edildikten sonra, eğitim ve validasyon dönemi çıktıları farklı ölçütler kullanılarak test edilmiştir. Kalibrasyon, eğitim ve validasyon dönemlerindeki performans sonuçlarıyla hesaplanan Nash-Sutcliffe (NS) katsayısı, RMSE'nin standart sapmaya oranlanmasıyla elde edilen RSR ve yanlışlık yüzdesini ifade eden (PBIAS) değerleri, ilgili çalışma baz alınarak aşağıdaki ölçütlere göre derecelendirilmiştir (Moriassi vd., 2007).

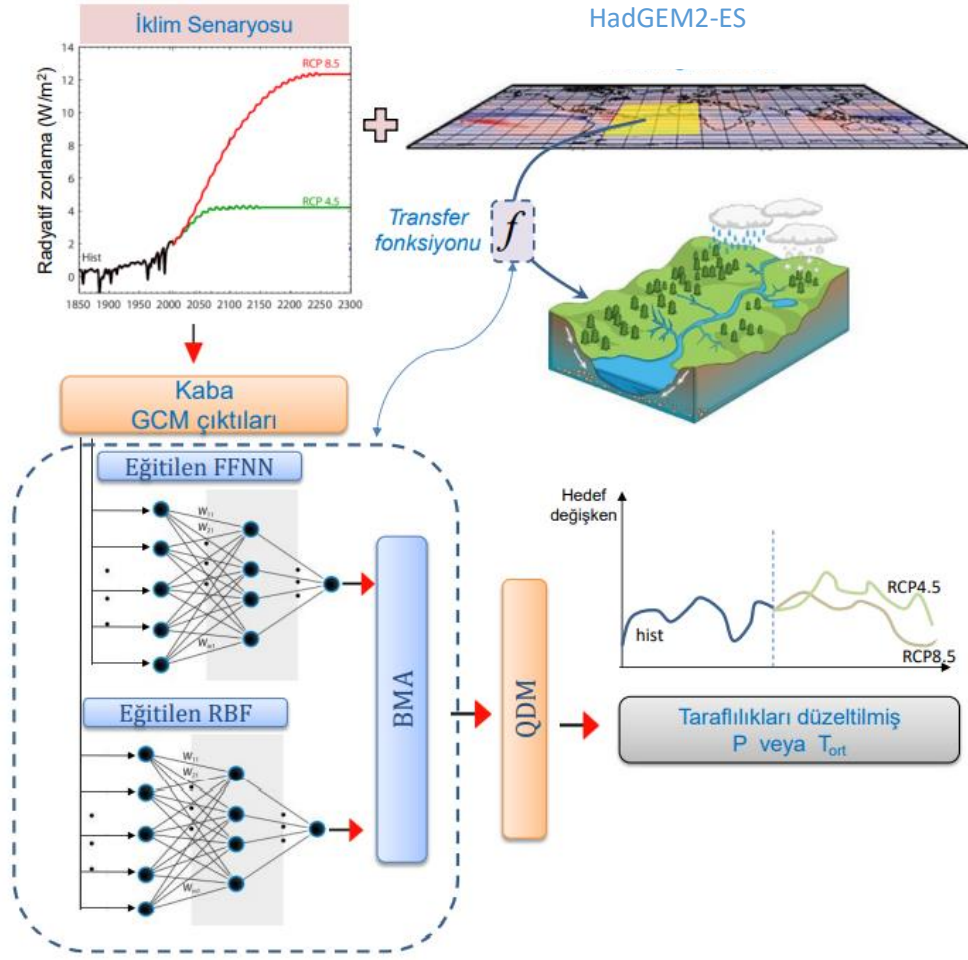
Çok iyi (VG): $NS > 0.75$; $RSR \leq 0.5$; $PBIAS(\%) < \pm 10$

İyi (G): $0.65 < NS \leq 0.75$; $0.5 < RSR \leq 0.6$; $\pm 10 \leq PBIAS(\%) < \pm 15$

Kullanılan modellerde gizli katmanda bulunan hücre sayıları sınama yanılma ile elde edilmiştir. Diğer bir yandan FFNN modelinde, tatminkâr sonuçlar verdikleri için gizli katmanda sigmoid, çıkış katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonları kullanılırken RBF modelinde girdi katmanından gizli katmana geçişte Gauss tipi aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Veri standardizasyonu Okkan ve Kirdemir (2016) çalışmasındaki ile aynı şekilde yapılmıştır. 1980-2010 referans dönemi için verilerin yarısı eğitim, kalan yarısı ile

de test edilen yapay sinir ağı tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin sonuçlarının makul olduğu kabul edildiğinde, GCM'lerin her biri için uygulama alanını belirten en yakın gridlerindeki standardize kaba senaryo çıktıları (hist senaryosu çıktıları ve 2021-2050 gelecek dönemini kapsayan RCP senaryo çıktıları) eğitilmiş FFNN ve RBF modellerine ait ağırlıkları ile yerel ölçekteki alansal ortalama P tahminine dönüştürülmüştür. Daha sonra model çıktıları arasındaki varyansı göz önünde bulunduran ve tahminlerdeki belirsizliğin hafifletilmesi adına uygun bulgular üretebilen (Duan vd., 2007) Bayesian Model Averaging: BMA yöntemi, algoritma ile üretilen sonuçları paralel hibritleme kabulüyle ağırlıklandırmak için kullanılmıştır. BMA' da pozitif ve toplamı 1 olması koşuluyla iteratif bir şekilde belirlenmekte ve belirlenen ağırlıklar modellerin izafi performansını ortaya koymaktadır.

Ölçek indirgeme modellemesinin ardından, GCM'lere ait hist senaryo tahmini dağılımları ile gözlenmiş dağılımlar arasındaki entegrasyon ile çıktılardaki yanlışlıklar da incelenmiştir. Bu sebeple “yanlılık düzeltme” yöntemleri kullanılarak, gelecek projeksiyonlara yanlışlıkların sirayet etme olasılığına karşın güvenilir tahminlere ulaşabilmek amaçlanmıştır. En temel dağılım tabanlı yanlışlık düzeltme, GCM'lerin ölçek indirgemeyle elde edilmiş senaryo tahminlerine ait dağılımların gözlenmiş dağılımların üzerine haritalanması esasına dayanan “kantil haritalama”dır (Cannon vd., 2015). Fakat hist senaryosuna ait çıktılar ile gelecek senaryo çıktıları arasındaki rölatif değişim ve zamansal trend yapısı klasik kantil haritalama (quantile mapping) sonrası muhafaza edilememekte ve çıktılarda ekstrem büyümeler gözlenebilmektedir. Tez çalışmasında bu rölatif değişim ve zamansal trend yapısını olabildiğince korumak adına kantil delta haritalama (quantile delta mapping: QDM) yöntemi tercih edilmiştir. Yönteme ait detaylar Cannon vd. (2015) çalışmasında bulunmaktadır. Tez çalışmada esas alınan istatistiksel ölçek indirgeme ve meteorolojik projeksiyon üretme aşamaları Şekil 2.1'de şematik olarak özetlenmiştir.

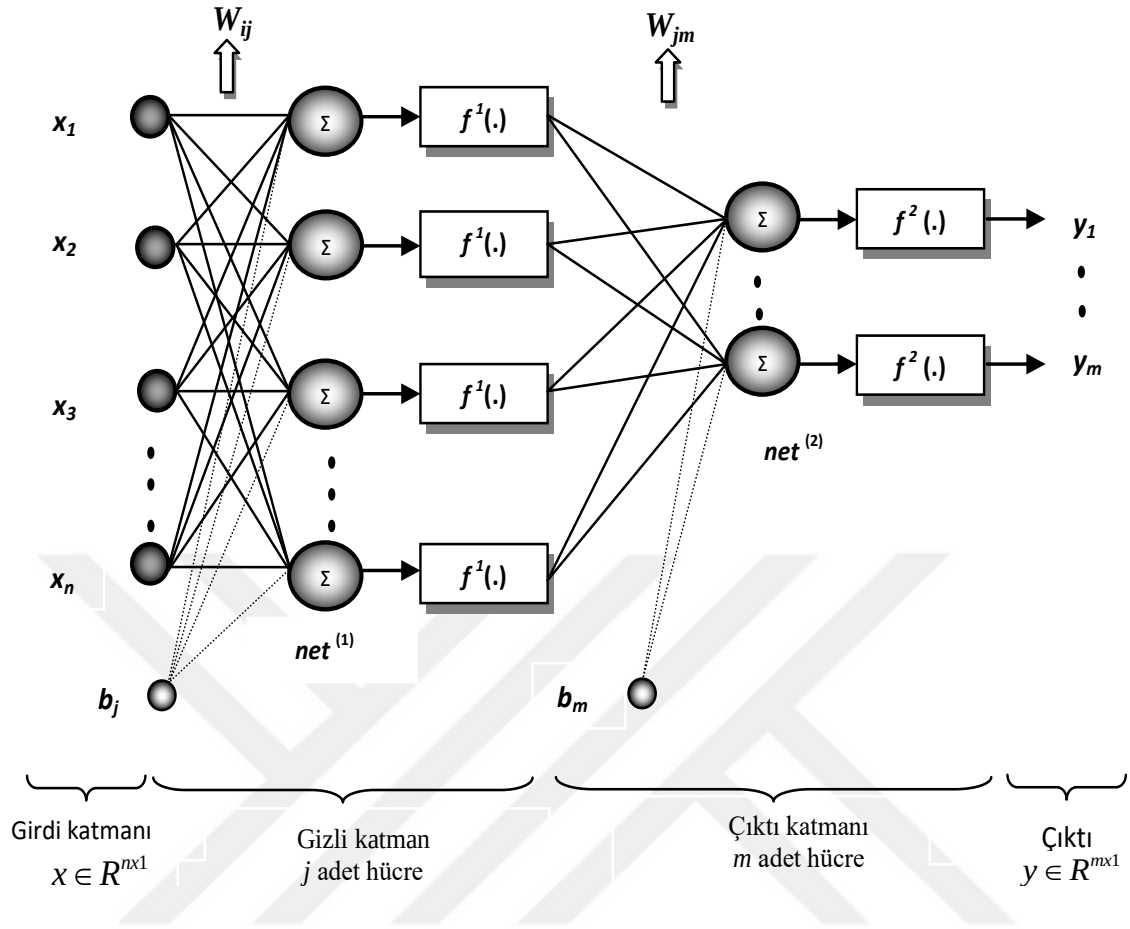


Şekil 2.1: Farklı iklim senaryoları kapsamındaki GCM çıktılarının istatistiksel ölçek indirgenmesinde izlenecek adımlar (Okkan vd., 2022).

2.2 Yapay Sinir Ağları

2.2.1 Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları (FFNN)

GCM'lerin kaba alansal çözünürlüklü çıktılarına yerel ölçeğe indirmek için tercih edilen istatistiksel ölçek indirgeme yönteminin oluşturulması sırasında kullanılan çok katmanlı yapay sinir ağları, modelleme, sınıflama ve tahmin uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Biyolojideki sinir sistemi ilkelerinden esinlenilerek geliştirilmiş matematiksel araçlardır (Ham ve Kostanic, 2001). Katmanlar halinde tanımlanan ve yine sinir sistemlerindeki aynı ilkeyle hücrelerin bir araya getirilmesiyle üretilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Çok katmanlı bir yapar sinir ağı yapısı (Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010).

Katmanları giriş katmanı, ara (gizli) katmanlar ve çıktı katmanı oluşturmaktadır. Bir ağda çok sayıda bulunabilen gizli katmanların sayısı ve her gizli katmanda ne kadar sinir hücresi ağı olması gerektiği, probleme de bağlı olarak deneme yanılma yöntemiyle tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Katmanlara ek olarak bir YSA modelini, girdiler (x), ağırlıklar (W), net fonksiyonu (net), aktivasyon fonksiyonu (f) ve çıktılar (y) olmak üzere 5 ana öge oluşturmaktadır (Şekil 2.2). Model içerisinde yer alacak olan girdi ve çıktılar uygulamaya veya probleme göre değişmektedir. Ağırlıklar girdilerin sistem içerisindeki faaliyetini sağlamakta ve bu sebeple de modelin öğrenme başarısını etkilemektedir. Girdilerin hücrelerdeki etkinlikleri ağırlıklı girdilerin toplamı şeklinde bulunan net fonksiyonu biçiminde tanımlanmaktadır. Hücelere gelen net girdiler aktivasyon fonksiyonları kullanılarak çıktı haline getirilmektedir. Farklı

biçimlerde aktivasyon fonksiyonları bulunmakta olup tez çalışmasında logaritmik sigmoid fonksiyonu tercih edilmiştir (Öztemel, 2003). Sigmoid fonksiyonu ile hücre çıktısı denklem 2.1’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010).

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp[-(net)]} \quad (2.1)$$

Yapay sinir ağının eğitimi de ağın kurulması kadar önemlidir. Ağın öğrenme kısmı girdilere karşın elde edilmesi gereken çıktıların öğrenmesini hedeflemektedir. Bu açıdan tez çalışmasında sıklıkla tercih edilen algoritmalarından olan ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı modeli tercih edilmiştir. Algoritmanın çalışma ilkesi ileriye doğru hesaplama ve geriye doğru hesaplama şeklinde olup iki aşamalıdır.

İleriye doğru hesaplama kısmına, girdi katmanındaki girdilerin ağa işlenmesi ile başlanıp ardından girdiler ağırlıklar ile çarpılarak gizli katmandaki her bir hücreye iletilmekte ve net girdi değerleri elde edilmektedir. Ardından elde edilen net girdi değerleri kullanılacak olan aktivasyon fonksiyonuna sokularak gizli katman hücrelerinin çıktısı elde edilmektedir. Bahsedilen işlem sonraki katmanlar için de tekrarlanarak çıktı katmanının tamamının çıktılarının hesaplanmasıyla ileri hesaplama işlemi sona ermektedir. İleri hesaplama aşamasında kullanılan eşitlik denklem 2.2’de aşağıda sunulmuştur.

$$y_m = f^{(2)} \left\{ \sum_{j=1}^m \left[f^{(1)} \left(\sum_{i=1}^n x_i W_{ij} + b_j \right) \right] W_{jm} + b_m \right\} \quad (2.2)$$

Denklemden; x_i ağdaki girdileri, W_j giriş katmanı ile gizli katman arasındaki sabit (bias) terimleri, W_{ij} giriş katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlıkları, $f(1)$ giriş katmanı ile gizli katman arasındaki aktivasyon fonksiyonunu, $f^{(2)}$ gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki aktivasyon fonksiyonunu, j gizli katmana ait hücre sayısını, m çıkış katmanındaki hücre sayısını, n giriş katmanındaki hücre sayısını, W_{jm} çıkış katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlıkları, W_m çıkış katmanı ile gizli katman arasındaki sabit (bias) değerleri temsil etmektedir.

İkinci aşama olan geriye doğru hesaplama kısmında ağdan üretilen çıkış değerleri hedeflenen çıkış değerleri ile kıyaslanmaktadır. Çıkış ve hedeflenen değerler arasındaki farkın kareleri toplamının (SSE) azaltılması ve kabul edilebilir düzeye indirgenmesi amaçlanmakta ve bu amaç ağa ait ağırlık ve eşik (bias) değerlerinin iteratif biçimde ilerleyerek güncellenmesi ile yapılmaktadır. Bu sayede ilk etapta rassal bir şekilde atanan ağ ağırlıkları, hata kareler toplamı olarak da adlandırılan SSE değeri istenen düzeye ulaşana kadar güncellenmektedir. Geriye doğru hesaplama aşamasındaki hata kareler toplamı hesabına dayanan bu amaç fonksiyonu denklem 2.3'te verilmiştir (Rumelhart, Hinton ve Williams, 1986).

$$E(W) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P (e_p)^2, \quad (P = mQ) \quad (2.3)$$

Denklemden, T eğitim aşamasında değerlendirilecek örnekleme, E performans fonksiyonunu, m çıktı katmanındaki hücre sayısını, e_p hataları ($b_p - y_p$) temsil etmektedir.

Tez çalışmasında kullanılmak üzere, belirlenen amaç fonksiyonunu en minimize hale getirecek ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı algoritması geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında hem hızlı yakınsama yeteneğine sahip olan hem de algoritma koşullarına ilişkin uygunluk fonksiyonu değerlerindeki sapmaları minimal düzeyde veren hibrit parçacık sürü optimizasyonu algoritmasından faydalanılmıştır (detaylar için bkz. Okkan ve Kirdemir 2020).

2.2.2 Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları (RBF)

Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağı kavramı, 1988 yılında Broomhead ve Lowe tarafından geliştirilmesiyle YSA literatürüne girmiştir (Broomhead ve Lowe, 1988). Standart çok katmanlı yapay sinir ağı model yapılarından farkı radyal tabanlı sinir ağında, girdi katmanı ile gizli katman geçişlerinde radyal tabanlı bir fonksiyon ve doğrusal olmayan kümeleme analizi kullanılmasıdır. Ana eğitimin burada gerçekleştirilirken gizli katman ve çıktı katmanı arasındaki işleyiş klasik YSA modellerindeki gibi sürdürülmektedir. Modelin ürettiği çıktı denklem 2.4 ile elde edilmektedir.

$$y_i = \sum_{k=1}^N W_{ik} \varphi_k(x, c_k) = \sum_{k=1}^N W_{ik} \varphi_k(\|x - c_k\|), i = 1, 2, \dots, m \quad (2.4)$$

Denklemden;

$x \in R^{n \times 1}$ ağırlık girdi vektörünü, $c_k \in R^{n \times 1}$ girdi vektör uzayının bir alt takımından seçilen radyal tabanlı merkezleri, $\varphi_k(.) \in R^+$ radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonunu, $\|.\|_2$ girdi vektörünün merkezden ne kadar uzak olduğunun bir ölçütü olan Öklidyen normunu, N gizli katmanda bulunan hücre sayısını, w_{ilk} ise çıkış katmanındaki ağırlıkları, temsil etmektedir.

Hücre merkezleri, çıkış katmanında bulunan ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonun yapısı radyal tabanlı sinir ağı modeli için önemlidir. Farklı yapılarda aktivasyon fonksiyonları bulunmakla birlikte tez çalışmasında Gauss fonksiyonu kullanılmış ve denklem 2.5 ile ifade edilmiştir.

$$\varphi_k(x) = \exp\left(\frac{-\|x - c_k\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

Gauss fonksiyonunu temsil eden bu denklemde x girdi vektörünü, c_k merkezleri temsil etmektedir. σ standart sapma değerini ifade ederken; modelinin performansını büyük ölçüde etkileyen dağılma (spread) parametresi olarak da bilinmektedir. (Ham ve Kostanic, 2001).

Modelin eğitim süreci iki aşama olmakla birlikte bunlar hücre merkezlerinin elde edilmesi (c_k) ve çıktı katmanına ait ağırlıkların (w_{ik}) optimize edilmesidir. Bu iki aşama için farklı teknikler bulunmaktadır. Çalışmada RBF modeline ait hücre merkezleri (c_k) K-ortalamlar yöntemi (MacQueen ve Some, 1967) kullanılarak hesaplanmıştır. Hücre merkezlerinin belirlendikten sonra belirli bir Q eğitim seti için ağırlık çıktısı (y) aşağıda ifade edilen denklem 2.6 ile hesaplanabilmektedir. Ayrıca dağılma parametresi genellikle tüm hücreler için sabit kabul edilmektedir. RBF modeli için dağılma parametresi deneme-yanılma tekniğiyle de belirlenebilmektedir.

$$y(q) = \sum_{k=1}^N w_{ik} \varphi_k(x(q), c_k), \quad i = 1, 2, \dots, Q \quad (2.6)$$

Ardından ağın ürettiği çıktılar ile hedeflenen çıktı değerleri arasındaki farklar karşılaştırılarak performans fonksiyonunun denklem 2.7 ile minimize edilmesi hedeflenmektedir.

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q [b(q) - y(q)]^2 = \frac{1}{2} (b - \varphi w)^T (b - \varphi w) = \frac{1}{2} (b^T b - 2b^T \varphi w + w^T \varphi^T \varphi w) \quad (2.7)$$

Denklemden, $E(w)$ performans (hedef) fonksiyonunu, y ağın ürettiği çıktı değerlerini, b ağın hedeflenen çıktılarını (istenilen veya ölçülmüş değerleri), Q eğitim setini ve T ise serinin transpozunu temsil etmektedir.

$E(w)$ 'nin ağırlıklara göre 1.dereceden türevi 0 değerine eşitlenerek $(\partial E(w)/\partial w = 0 \rightarrow \phi^T b + \phi^T \phi w = 0)$ Bulunan eşitlik Moore-Penrose Sözde Ters (Pseudo-inverse) tekniği ile çözülerek ağın çıkış ağırlıkları denklem 2.8 ile belirlenmiştir.

$$w = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T b = \varphi^+ b \quad (2.8)$$

2.3 Akım Projeksiyonlarının Elde Edilmesi

Tez çalışmasında uygulanacak olan haznede iklim senaryoları altında kuraklık analizi için sözü edilen senaryolar altında akım projeksiyonlarının elde edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda tez çalışmasında dinamik su bütçesi modeli (dynwbm) ve abcde adlı parametrik-ortalıanmış kavramsal yağış akış modelleri kullanılmıştır. Bahsi geçen modeller ülkemizdeki havzalarda aynı seyirde giden ve değişen iklim koşulları göz önünde bulundurulduğunda akış tahmini elde etmede yeterli görülen hidrolojik modellerdir (Okkan 2015; Okkan ve Kıymaz 2020; Okkan ve Kıymaz 2018, 2020). Girdi olarak sadece aylık toplam yağış ve potansiyel evapotranspirasyon (PET) gereken bu modeller havza hidrolojisi bir dizi kavramsal zemin nemi yeraltısuyu depolama fonksiyonlarıyla oluşturulmaktadır (Şekil 2.2). Modeller için gerekli olan PET değerleri, hem Penman gibi ampirik eşitlikler ile hem de tava buharlaşması (Epan) gözlemlerinin PET yerine tercih edilmesiyle elde edilebilmektedir (Xu ve Vandewiele 1995). Tez çalışmasında gözlenmiş dönem ve projeksiyon dönemlerindeki Epan değerleri sadece ortalama sıcaklık değerlerine bağlı olarak uygulama alanları için lokal kalibrasyonu yapılan Kharrufa eşitliğinden (denklem 2.9) türetilmiştir.

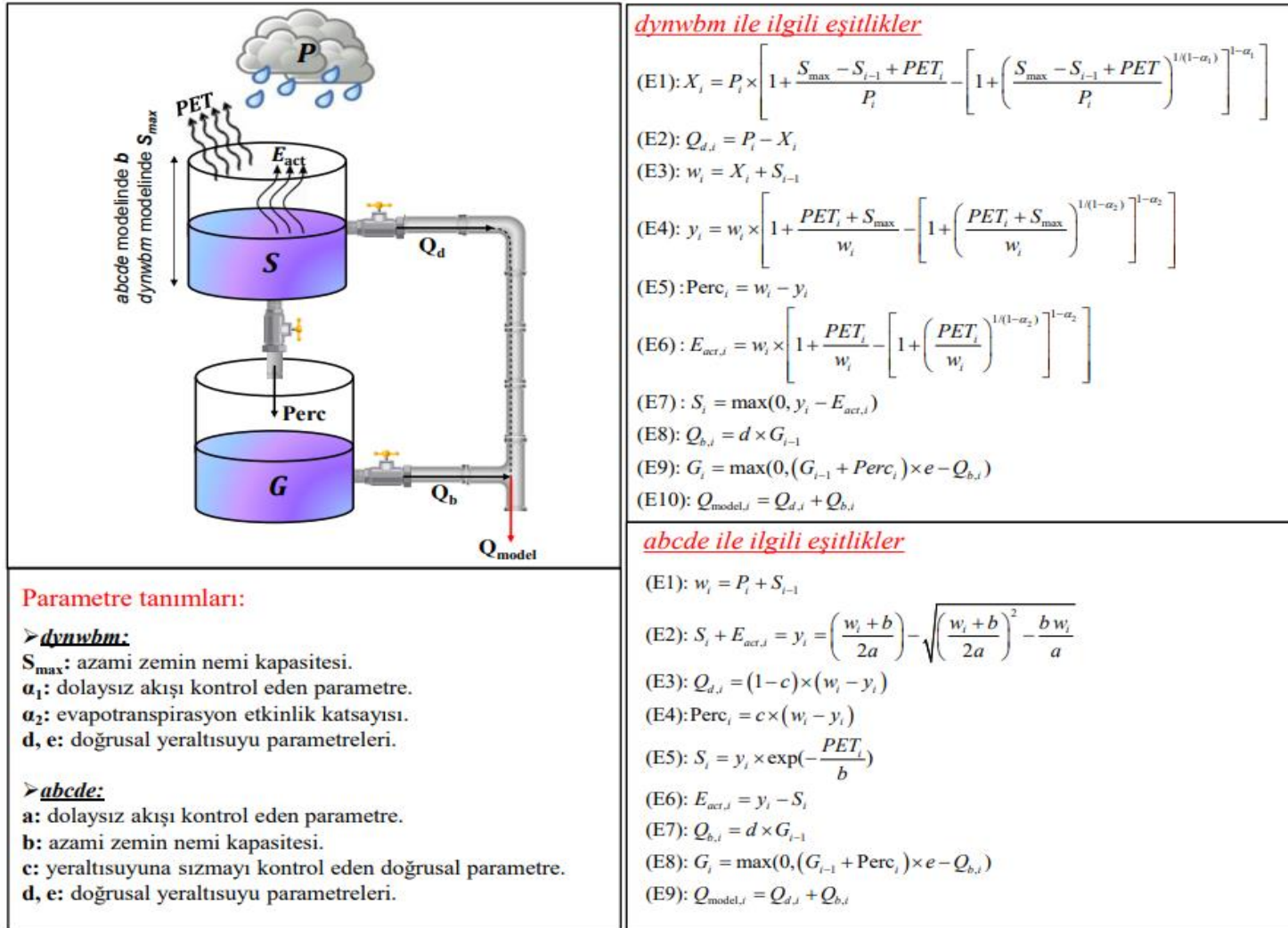
$$E_{pan} = a \times pk \times T^b \quad (2.9)$$

Çalışma kapsamında tercih edilen modellerden dynwbm Zhang vd. (2008) tarafından geliştirilmiş ve aslında Budyko (1958) tarafından öne sürülen hipotezin geliştirilmiş şekli niteliğinde olan parametrik bir kavramsal modeldir. Modelin orijinalinde 4 adet parametre bulunmasında rağmen, Okkan ve Kirdemir (2018, 2020) tarafından modelin yeraltısuyu depolaması fonksiyonuna doğrusal bir parametre ilave edilmiş ve modelin 5 parametreliliği elde edilmiştir. Modelde rastgele bir ayda havza üzerine düşen toplam yağış P iki bileşenin toplamından oluşmaktadır. İlk kısım dolaysız akış (Q_d) olup kalanı kısım X diğer bütçe elemanları için ayrılmaktadır. Bu aşamada α_1 parametresi etkin rol oynamakta ve değer olarak arttığında X artarken dolaysız akış azalmaktadır. Ayrıca bu durumda havzanın zemin ve vejetasyon karakteristiklerini simgeleyen S_{max} maksimum zemin nemi kapasitesi de etkin rol oynar. Öte yandan α_2 parametresi evapotranspirasyon etkinliğini kontrol ederek artması durumunda mevcut suyun (W) gerçek evapotranspirasyona ayrılan kısmında artış oluşur (Zhang vd.2008; Tekleab vd. 2011). Aynı parametre y evapotranspirasyon fırsatı (evapotranspiration opportunity) olarak tanımlanan değişkeni de kontrol ederek y değeri ilgili aydaki zemin nemi (S_i) ve gerçek evapotranspirasyon (E_{act}) toplamına eşit kabul edilmektedir (Sankarasubramanian ve Vogel 2002). Söz konusu ay süresince havzada bulunan su içeriği W_i başlangıç zemin nemi S_{i-1} ile X'in toplamı ile elde edilebileceği gibi ilgili aydaki zemin nemi, gerçek evapotranspirasyon ve yeraltısuyu depolamasına sızan (P_{erc}) su miktarı bileşenlerinin toplanmasıyla da elde edilebilmektedir. Bu bütçe hesabından P_{erc} miktarı hesaplandıktan sonra, d ve e parametreleri birlikte kullanılarak lineer hazne davranışı gösterdiği varsayılan G yeraltısuyu depolaması özelinde denge denklemi yazılır ve buradan taban akışı (Q_b) tahmin edilir (Okkan ve Kirdemir 2018, 2020). Dolaysız akış ve taban akışının toplamı ise kesitteki modellenmiş total akışı (Q_{model}) sunmaktadır. Şekil 2.3'te özetlenen eşitliklerin (E1-E10) detaylı anlatımı Tekleab vd. (2011) tarafından verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında tercih edilen diğer model ise Thornthwaite (1948) tarafından öne sürülen yaklaşıma dayanmakla birlikte sızma bileşeni açısından daha gerçekçi bir kavramsallaştırma sunmaktadır. Bu bağlamda Okkan ve Kirdemir (2018, 2020) tarafından önerilen ve dynwbm modeline de uyarlanan yeraltısuyu depolama fonksiyonu Thomas (1981) tarafından geliştirilen abcd modeline de entegre edilmiş ve model beş parametreliliği

abcde haline getirilmiştir. Bu model dynwbm modeli ile benzer depolama elemanları kullanmasına karşın dynwbm modeliyle kıyaslandığında hesap yoğunluğu açısından daha sade bir yapıya sahiptir. İlgili ay boyunca havzadaki su içeriği W^i , dynwbm'ye kıyasla daha kaba bir hesaplama, bir önceki aydan kalan zemin nemi S_{i-1} ile P'nin toplamına eşit kabul edilmektedir. Evapotranspirasyon fırsatı olan y değeri a ve b parametrelerine bağlı kalınarak hesaplanmakta ve bu iki parametre sırasıyla zeminin suya doymadan önce akış oluşturma eğilimini ve zeminin doygunluk düzeyini kontrol etmektedir (abcde modelindeki b'nin dynwbm'deki S_{max} 'ın karşılığı olduğu söylenebilir). a parametresinde artış olması halinde Q_d ve perkole olan Perc miktarında azalma gözlenirken, b'deki artış bu olayın tersinin yaşanmasını sağlar. Mevcut su miktarının belli bir kısmı y için ayrıldıktan sonra geriye kalan kısım ise c doğrusal katsayısına bağlı olarak Q_d ve Perc bileşenlerine ayrılır (Li vd. 2016; Shahid vd. 2018). Modelin G yeraltısuyu depolaması için uygulanan denge denklemi ve taban akışı hesap yaklaşımı dynwbm modelinki ile aynıdır. Dolaysız akış ve taban akışı bileşenlerinin toplamı da yine benzer şekilde modellenmiş akışı vermektedir. Şekil 2.3'te modele ait genel yapı, parametre tanımları ve bu parametrelere bağlı gerçekleştirilen hesap adımları (E1-E9) özetlenmiştir.

Çalışmada yukarıda işleyişi verilen iki adet yağış-akış modeli 1981-2010 su yıllarını kapsayan dönemdeki gözlemlerin yarısı ile (1981-1995 yıllarına ait gözlemler) RMSE minimizasyonu amaç fonksiyon olarak alınarak ayrı ayrı kalibre edilip, tüm kalibrasyon çıktıları ölçek indirgeme işleyişinde kullanıldığı gibi BMA yaklaşımıyla ağırlıklandırılmıştır. Çıktıların ağırlıklı ortalaması ile ansambl sonuçlar elde edilmesinin ardından 1996–2010 su yıllarını kapsayan ağırlıklı validasyon çıktıları da NS katsayısı gibi ekstra kriterlerce sınanmıştır. Bu aşamada yapılan performans derecelendirmesi ölçek indirgeme modellemesinde baz alınan ile aynıdır. Sonuç olarak modellemenin istenen simülasyon performansı vermesi durumu gözetilerek Şekil 2.3'teki işleyiş ile türetilen 2021-2050 dönemi P ve Tort projeksiyonlarının akış yüksekliklerine dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3: Yağış-akış modellerinin şematik gösterimleri, modellere ait parametre tanımları ve ilgili hesap adımlar (Okkan vd., 2022).

2.4 Kullanılan Kuraklık İndisleri

2.4.1 Standardize Akım İndeksi (SRI)

Standardize akım indeksi SRI yöntemi (Mckee vd., 1993; Shukla ve Wood, 2008) çoklu zaman ölçümlerinde kuraklığı hesaplayabilmek adına önerilmiştir. Referans alınan zaman zarfında SRI'nin değeri referans alınan zaman süresindeki yağışın (veya akımın) aritmetik ortalamasından elde edilen farkın aynı zaman dilimindeki standart sapmaya bölümüyle elde edilmektedir. Gamma dağılımına olan uyumluluğu normal dağılımdan daha fazla olan yağış değişkeni için yöntemin uygulanması sırasında bir modifikasyon ileri sürülmektedir. Söz konusu işlemler aşağıda sunulmuştur.

- Gamma olasılık dağılımı şekil parametresi α ve ölçek parametresi β maksimum olabilirlik algoritmasıyla hesaplanır.
- Gamma olasılık dağılımındaki eklenik dağılım fonksiyonu $G(x)$ hesaplanır.
- Gamma dağılım fonksiyonu, $x=0$ değeri için tanımlı olmaması sebebiyle akımsız etmenlerin gerçekleşme sıklığı olan q hesaba katılarak eklenik dağılım fonksiyonu güncellenir ($H(x)=q+(1-q)G(x)$). Tez çalışmasında yıllık ortalama akımlar kullanıldığı için $q=0$ olarak gözlenmiş ve $H(x)=G(x)$ kabul edilmiştir.
- Daha sonra $G(x)$ değerleri denklem 2.10 ve denklem 2.11'de yer alan eşitlikler ile yaklaşık olarak varyansı 1, ortalaması 0 olan standart normal değerlere (Z) dönüştürülür (Liu vd., 2012; Abramowitz ve Stegun, 1965).

$$Z = SRI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)} & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} & 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

Burada $c_0=2.515517$; $c_1=0.802853$; $c_2=0.010328$; $d_1=1.432788$; $d_2=0.189269$; $d_3=0.001308$ olarak tanımlanmıştır (Okkan ve Altun, 2019; Liu vd., 2012).

- Hesaplanan Z değerlerine göre kuraklık şiddeti sınıfı belirlenir. Baz alınan kurak-sulak şiddetlerine ait kategori Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1: SRI için kuraklık sınıfları (McKee vd., 1993; Trambauer vd., 2014).

Üst Limit	Alt Limit	Sınıfı
∞	2.0	Çok Şiddetli Sulak (S1)
1.99	1.50	Şiddetli Sulak (S2)
1.49	1.0	Orta Şiddetli Sulak (S3)
0.99	0	Normal (N)
0	-0.99	Normale Yakın Kurak (K1)
-1.0	-1.49	Orta Şiddetli Kurak (K2)
-1.50	-1.99	Şiddetli Kurak (K3)
-2.0	$-\infty$	Çok Şiddetli Kurak (K4)

2.4.2 Paylaştırılmış Entropi (PE) Yaklaşımı

Bilgi teorisinde entropi, bir gözlemin sonucu olarak bir sürecin bilgi içeriğini ifade eder. Hidroloji ve su kaynakları mühendisliğinde, stokastik süreçlerdeki belirsizlikler, parametrelerin tahmini, havzanın jeofizik faktörleri vb. gibi alanlarda değerlendirilen entropi yaklaşımı Bacanlı vd., (2017) çalışmasında detaylandırılmıştır. Paylaştırılmış Entropi (Apportionment Entropy-PE) yöntemi, zaman serisi şeklinde sunulan hidrolojik değişimin (yağış, akım gibi) nispi frekansları baz alınarak yapılan kuraklık analizi bağlamında Kawachi vd., (2001); Maruyama vd., (2005); Bacanlı vd., (2017) ve Bacanlı vd., (2013) çalışmalarında uygulanmıştır. Bacanlı vd., (2017) çalışmasında bu yöntem, süreç adına edinilen bilgilerin bir zaman dizisi olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Tez çalışmasında 12 aylık (yıllık) SRI yöntemini PE yöntemiyle kıyaslayabilmek adına, tüm su yıllarına ait ortalama akımlar elde edildikten sonra yıllar arası uzun dönem ortalamasını ifade eden Rort hesabına geçilir. Bu değer Bacanlı vd., (2017) çalışmasında ifade edilen marjinal entropi ifadesine yakın biçimde nispi frekans hesaplanmasında değerlendirilmektedir. Buna göre paylaştırılmış entropi (PE) su dönemi boyunca ortalama akım verileri esas alınarak m. yıl için Denklem 2.12’deki gibi tanımlanmaktadır.

$$PE_m = - \sum_{i=1}^{12} (r_i/R_{ort}) \log_2(r_i/R_{ort}) \quad (2.12)$$

Bu denklemde $\log_2$ 2 tabanındaki logaritmayı, r_i i. aydaki ortalama akımı ifade etmektedir. Tüm su yılları için Denklem 2.11'in uygulanmasının ardından, her yıl için hesaplanmış PE değerinin uzun dönem ortalama PE'ye olan uzaklık durumuna göre kuraklık indeksi sınıflandırılması yapılmaktadır (Bacanlı vd., 2017, Bacanlı vd., 2013). Yıllık ortalama yağışlara ait dağılımın standart Gauss dağılımına yakınsayacağı kabul edildiğinde, uzun dönem (N yıl sayısını temsil etmektedir ve bu çalışmada N=30 yıllık) PE değerlerinin ortalamasının Denklem 2.13 ile varyansının ise Denklem 2.14) ile hesaplanmasının ardından kuraklık indeksi sınıflandırılması Tablo 2.2 baz alınarak yapılmıştır.

$$\overline{PE} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{m=1}^N PE_m \quad (2.13)$$

$$Var(PE) = \left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{m=1}^N (PE_m - \overline{PE})^2 \quad (2.14)$$

Tablo 2.2: Paylaştırılmış entropi tekniğinde elde edilen PE değerinin üst ve alt limitlerine ait kuraklık şiddeti sınıfları (Bacanlı vd., 2017).

Üst Limit	Alt Limit	Sınıfı
∞	$\overline{PE} + (2\sqrt{Var(PE)})$	Şiddetli Sulak (Şs)
$[\overline{PE} + (2\sqrt{Var(PE)})]$	$[\overline{PE} + (\sqrt{Var(PE)})]$	Sulak (S)
$[\overline{PE} + (\sqrt{Var(PE)})]$	$[\overline{PE} + (\sqrt{Var(PE)}/2)]$	Yarı Sulak (Ys)
$[\overline{PE} + (\sqrt{Var(PE)}/2)]$	$[\overline{PE} - (\sqrt{Var(PE)}/2)]$	Normal (N)
$[\overline{PE} - (\sqrt{Var(PE)}/2)]$	$[\overline{PE} - (\sqrt{Var(PE)})]$	Yarı Kurak (Yk)
$[\overline{PE} - (\sqrt{Var(PE)})]$	$[\overline{PE} - (2\sqrt{Var(PE)})]$	Kurak (K)
$\overline{PE} - (2\sqrt{Var(PE)})$	$-\infty$	Şiddetli Kurak (Şk)

3. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

Ülkemizde yoğun bir nüfusa sahip olan İzmir şehrinin su temini, giderek artan nüfus yoğunluğunun etkisi ve iklim değişikliği problemleri sebebiyle önem arz etmektedir. İklim değişikliği sebebiyle yaşanan kuraklıklar ve bahsedilen nüfus artışı yüzünden şehrin su ihtiyacını temin eden Tahtalı Barajı'nın yeterli olmaması durumu için Gördes ve Çağlayan Barajları tasarlanmıştır. Yakın tarihte kullanımına başlanması planlanan bu yeni su kaynaklarının olası iklim değişikliği etkileri ve belirsizlikleri altında optimum işletilmesi gerektiğinden tez çalışmasında bu iki barajdan Gördes Barajı kullanılmıştır. Gördes Barajı için 2040 yılı nüfus projeksiyonuna bağlı olarak hesaplanan talep değerleri gözetilmiştir. Gördes Barajı'nın yakınlarında bulunan sulama birliklerine yıllık 72 hm³ hacimle katkıda bulunması ve İzmir'e yılda 63 hm³ su iletmesi planlanmaktadır.

Dolgu baraj kapsamında olan Gördes Barajı Gördes Deresi üzerinde işletilecektir. Baraj haznesine ait göl yüzey alanı ve hacim eğrileri Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup Gördes Barajı haznesinin maksimum ve minimum işletme hacimleri sırasıyla 448.46 ve 18.30 hm³ olarak raporlanmıştır. 1981-2010 döneminde yıllık ortalama sıcaklık 13.95 °C, yağış 575 mm/yıl, tava buharlaşması 1500 mm/yıl ve akış yüksekliği 132 mm/yıl'dır. Gördes havzasının alansal ortalama yağış değerlerinin hesaplanabilmesi için ArcGIS yazılımı kullanılarak istasyonlar arasında Thiessen poligonları oluşturulmuştur. Gördes Havzası yağışlarını temsil eden 7 adet istasyon sırasıyla Gölarmara, Yukarı Poyraz, Kıranşih, Hanya, Kavakalan, Demirci ve Gördes olup bunlardan Gördes, Hanya, Kavakalan ve Yukarı Poyraz ile alanın yaklaşık %95'i temsil edilebilmektedir. İstasyonlara ait detaylı bilgiler Tablo 3.1'de, çalışma alanına ait detay Şekil 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1: İstasyonlara ait detaylı bilgiler.

İstasyon Adı	İstasyon Numarası	Kot (m)	Enlem (°)	Boylam (°)
Gölarmara	5273	150	38.717	27.917
Yukarı Poyraz	05-013	630	38.683	28.233
Kıranşih	05-016	670	38.800	28.383
Hanya	05-010	640	39.033	28.450
Kavakalan	05-011	460	38.817	28.050
Demirci	17746	851	39.050	28.650
Gördes	4930	550	38.933	28.300



Şekil 3.1: Tez çalışması kapsamında kullanılan havzaya ait konum.

3.1 HadGEM2-ES İklim Modeli ve NCEP Re Analiz Verileri

Gözlenen hidro-meteorolojik veriler haricinde 2020-2050 dönemi için alansal ortalama yağış tahminlerini hesaplayabilmek için IPCC'nin yayımladığı 5. Değerlendirme Raporu'nda (AR5) yer alan iklim senaryoları ve bahsi geçen senaryolar altında çalıştırılan farklı CMIP5 iklim modelleri içerisinde HadGEM2-ES değerlendirilmiştir. Açılımı Hadley Merkezi Küresel Çevre Modeli 2 olan bu sürüm fiziki bir perspektif ile değişik karmaşıklık düzeyleri barındıran özel model yapılandırılmalarının bir dizinini kapsamaktadır (MetOffice, url; Demircan vd., 2014). HadGEM2 ailesi, bir araya geldiğinde atmosfer-okyanus konfigürasyonunu ve/veya canlı bitki örtüsü, okyanus biyoloji ve atmosferik kimyasıyla Dünya-Sistem konfigürasyonu ve yeterli bir çözümle stratosferinde içinde bulunduğu atmosferdeki bir dikey uzantısını barındırır. HadGEM2 ailesi üyeleri İklim Değişikliği Hükümetlerarası Paneli (IPCC) Beşinci Değerlendirme (AR5) raporu kullanılmıştır. Standart atmosferik bileşeni, 1.875° boylam ve 1.25° enlem aralığında yatay çözünürlüğünden ve 192 x 145 grid hücresinden meydana gelen küresel bir grid yapısı ile yaklaşık 40km yüksekliğe erişen 38 seviyeye sahiptir. HadGEM2 iklim modeline ait diğer bilgiler Tablo 3.1'de sunulmuştur. AR5 senaryoları, radyatif zorlamadaki zamanla meydana gelen değişiklikler dikkate alınarak tanımlanır ve bu senaryolara RCP'ler (Temsilci Konsantrasyon Yolları) adı verilir. Çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılmıştır. RCP4.5 daha iyimser bir eğilim gösterirken RCP8.5 2100 senesinde radyatif zorlamanın yer kabuğunda yaklaşık olarak 8.5 W/m²'ye ulaşacağını ardından 2200'li senelere kadar giderek artan bir eğilim sergileyeceğini belirten kötümser senaryodur (Meinshausen vd. 2011). RCP4.5 ile belli bir süreye kadar oldukça benzer radyatif zorlama eğilimine sahip olması sebebiyle RCP6.0 tez çalışmasında kullanımı tercih edilmemiştir. İklim modelinin geçmiş emisyon şartlarını temsil etmesi düşünülen geçmiş senaryo da referans kıyaslama senaryosu (hist) olarak kullanılmıştır.

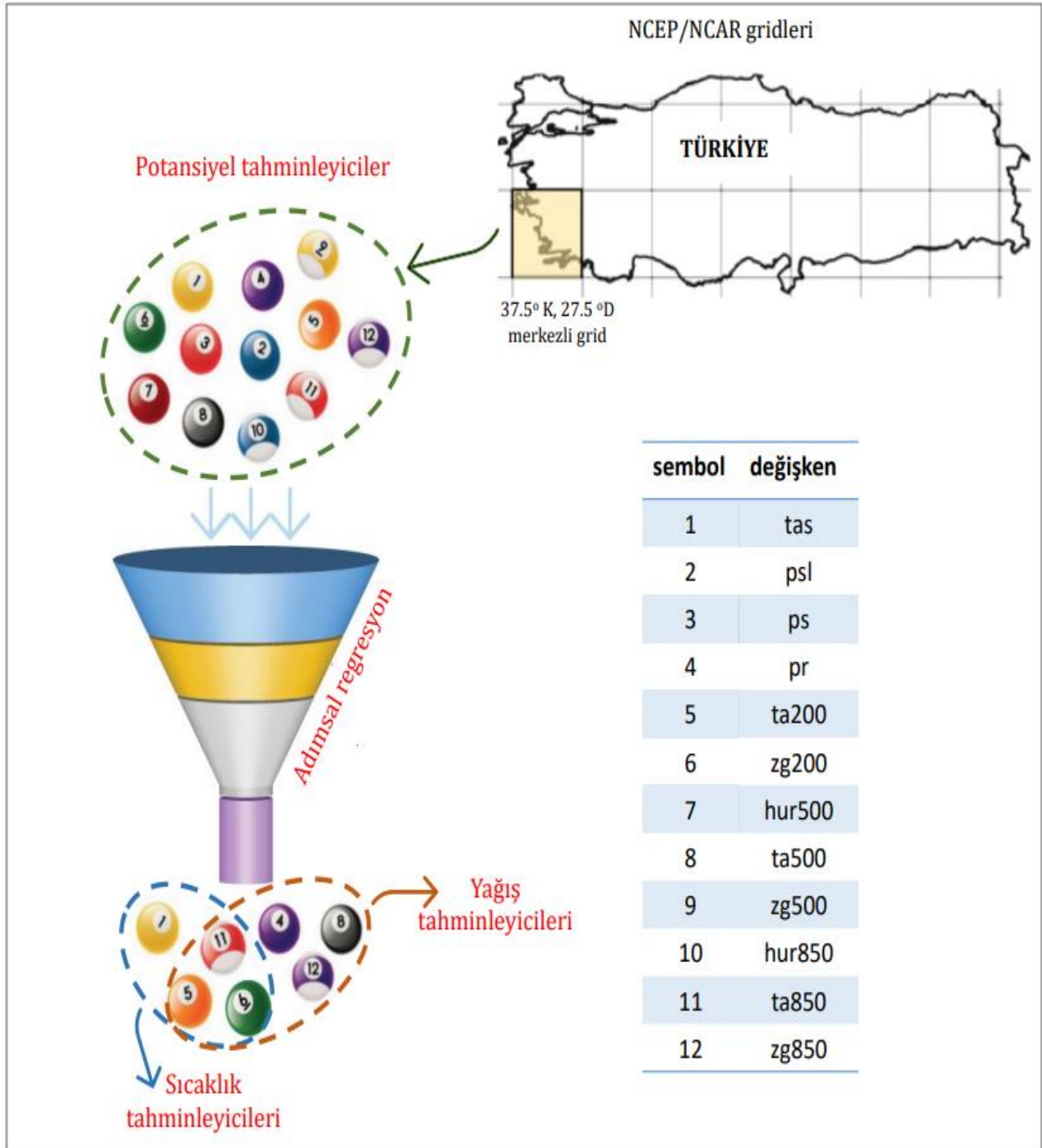
Tablo 3.2: Çalışmada değerlendirilen CMIP5 modeli ve buna ilişkin genel bilgiler.

Model ismi	Araştırma Merkezi	Ülke	Çözünürlük
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	İngiltere	1.25 x 1.875

CMIP5 kapsamında kullanılan HadGEM2-ES modelinin kaba çözünürlüklü (yerel ölçeğe indirgenmemiş) çıktıları temsili coğrafi hücreler (gridler) için <http://pcmdi9.llnl.gov> bağlantısından elde edilmiştir. Bu çıktılar “.nc” uzantılı şekilde arşivlendikten sonra hazırlanan Matlab kodu ile ayrıştırılmış ve kullanıma uygun şekle getirilmiştir.

Kaba çözünürlüklü GCM çıktılarının yerel ölçeğe indirgenebilmesi adına öncelikle bölgesel atmosferik değişkenler ile havzalardaki alansal ortalama aylık toplam yağış (P) gözlemleri arasında istatistiksel bağıntıların (transfer fonksiyonlarının) geliştirilmesi gerekmektedir. “İstatistiksel ölçek indirgeme modellemesi” olarak tanımlanan bu teknik Bölüm 2.1’de ayrıca anlatılmıştır. Tez kapsamında bölgesel atmosferik değişkenler olarak $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ alan çözünürlüğündeki NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research) (Kalnay vd., 1996) re-analiz veri setlerinden faydalanılmıştır. 1981-2010 ortak referans iklim dönemini baz alan bu veriler <http://www.cdc.noaa.gov/> adresinden “.nc” uzantılı formatta elde edilmiş ve uygulama alanını temsil eden 37.5° K, 27.5° D merkezli grid verileri Matlab ortamında düzenlenmiştir.

Ayrıca tez kapsamında NCEP/NCAR veri setleri ve kullanılan CMIP5 modelinin RCP ve geçmiş dönem senaryoları kapsamında sunulan ortak birkaç potansiyel değişkenler de tayin edilmiştir. Söz konusu bu değişkenler 200 mb, 500 mb, 850 mb atmosferik seviyelerindeki sıcaklık (ta200, ta500, ta850), geopotansiyel yükseklik (zg200, zg500, zg850), rölatif nem değişkenleri (hur500, hur850) ve ayrıca yüzey sıcaklık (tas), basınç (ps), deniz seviyesi basıncı (psl) ve alansal yağış (pr) değişkenleridir. İstatistiksel ölçek indirgeme modellemesi aşamasından önce kullanılan havzaya ait gözlenmiş alansal ortalama yağışları simgeleyen dominant NCEP/NCAR tahminleyicilerin tayini adımsal regresyon analizi (SRA) ile sağlanmıştır. Bu yöntemin ölçek indirgeme kapsamında bulunan uygulamalar ve diğer detaylar Huth (1999), Linderson vd. (2004) ve Yang vd. (2017) çalışmalarında bulunmaktadır. Uygulama havzasında Thiessen alansal ortalama yağışlar için yapılan SRA işleminin ardından pr, ta200, ta500, ta850, zg200 ve zg850 olmak üzere 6 tane açıklayıcı tahminleyici değişkene karar verilmiştir. Bu süreçte, bağımlı değişkene katkı sağlamayan değişkenler iteratif biçimde ayıklanmış ve varyansı açıklama miktarı açısından tatmin edici kombinasyon tercih edilmiştir. Şekil 3.2’te SRA işleminin uygulanışı şematik olarak özetlenmiştir. Yöntemin detaylarından bölüm 3.2’de bahsedilmiştir.



Şekil 3.2: Adımsal regresyon ile seçilen açıklayıcı tahminleyiciler (Okkan vd., 2022).

3.2 Adımsal (Kademeli) Regresyon

İstatistiksel ölçek indirgeme modellemesi aşamasından önce kullanılan havzaya ait gözlenmiş alansal ortalama yağışları simgeleyen dominant NCEP/NCAR tahminleyicilerin tayini adımsal regresyon analizi (SRA) ile sağlanmıştır. $Y=a + bx \pm \varepsilon$ doğrusal bağlantısı, iki adet değişken için kullanılabilecek en temel matematiksel ifadedir. Bu ifadeden yola çıkarak, bağımlı değişken y 'nin ve bağımsız değişken x 'in belirli bir düzeyi için alabileceği ölçümsel sonucun ε kadar bir hata yapacağı göze alınarak tahmin edilebilmektedir. (Lindley,1987).

X , yani bağımsız değişkenin birden çok olması durumunda (örn; $x_1, x_2, x_3, \dots$) ifadenin genel hali de; $Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + \varepsilon$ şeklinde tanımlanır ve bu tarz eşitlikler çoklu regresyon denklemleri olarak isimlendirilir (Hocking, 1976).

İkili veya çoklu doğrusal bağlantı eşitliklerinde, R^2 ile ifade edilen ve determinasyon katsayısı olarak isimlendirilen bu ölçüt, matematiksel modelin gerçeğe yakınlığını yansıtan özel bir göstergedir. Söz konusu katsayı bağımlı değişken y 'nin gözlenmiş değeri ile modelde tahminlenen değeri arasındaki korelasyon katsayısının karesidir. Bu değer, bağımlı değişkendeki sapmaların hangi oranda direkt bağımsız değişken üzerindeki farklılıklardan kaynaklandığını belirtir yani nedensellik hakkında epey belirgin fikir verir (Barret,1974).

Tez kapsamında gerçek anlamda tek başına etkin olan nedensel etmenleri ayırt edebilmek ve sadece yeteri kadar değişken kullanılarak en iyi akım tahminlerini sağlamanın daha iyi olacağına karar verilmiştir. Bu bağlamda kullanılan yöntem, Adımsal regresyon yöntemi adıyla anılmakta ve birkaç farklı şekilde kullanılabilmektedir. İlki Enter (Toplu giriş) olarak isimlendirilen bu yöntemde tüm bağımsız değişkenleri içeren çoklu bir regresyon modeli kurulduktan sonra kurulan modelin haricinde her bir bağımsız değişkenin bağımlı olan değişkeni etkilemesindeki istatistiksel anlamlılık seviyesi de elde edilmiş olur. Bu şekilde anlamlı olan değişkenlerin gerçek nedensel unsunlar olduğu kalanlarının ise bağımlı olan değişkeni sadece dolaylı olarak etkileyebildikleri (belki de hiç etkilemedikleri) anlaşılmış olur. Bu kademedan sonra yalnızca anlamlı değişkenler ile minimum değişkenle en yüksek tahminlerin elde edilebileceği regresyon modelinin araştırmasına başlanabilir. Az sayıda veya tek bir bağımsız değişken kullanılarak bağımlı

değişkeni (akım), oldukça yüksek bir doğrulukta tahminleme imkânı varsa, anlamlı olsa dahi kalan değişkenleri kullanmanın gereksiz olduğu düşünülmektedir.

Bu bağlamda iki farklı teknik tercih edilebilmektedir; birincisi İleri doğru seçim (Forward selection) yöntemi olmakla birlikte bu yöntemde modele, öncelikle bağımlı değişkenle en fazla korelasyon elde edilen tek bağımsız kullanılır. Bu bağımsız haricinde, ikinci güçlü bağımsız oluşan yeni modelin tahmin gücü anlamlı olarak artış göstermiyorsa tek değişkenli model yeterli olmaktadır. İşlem her defasında tahmin düzeyinin anlamlı olarak artış göstermesi şartıyla birden fazla değişkenin olduğu fakat genellikle tüm değişkenlere kadar gitmeyen bir modelle sonlanır.

Söz konusu yöntemin tersi olan Geriye doğru eleme (Backward elimination) yönteminde öncelikle tüm değişkenler modelde elde edilir ve en düşük bölümsel korelasyonu ifade eden değişken modelden çıkarılarak tekrar inceleme yapılır. Yeni modelin tahmini eskisine oranla anlamlı şekilde artış gösteriyorsa sıradaki yetersiz değişken elenerek işlem devam ettirilir. Tez çalışmasında bu adımlar için MATLAB paket programından faydalanılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Ölçek İndirgeme Modelinin Kalibrasyon ve Validasyon Performansları

Tez çalışmasının ilk aşamasında seçilen GCM'in hist ve RCP senaryoları çıktılarının yapay sinir ağları ve BMA ile birlikte kullanımıyla istatistiksel ölçek indirgeme modelleriyle aylık toplam yağış (P) ve aylık ortalama sıcaklık (T_{ort}) değerlerine dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde öncelik olarak Bölüm 2.1'de açıklanmış olan ve transfer fonksiyonu görevini görebilecek istatistiksel ölçek indirgeme modelinin kurulumu gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.1'de belirtilmiş olan 1980-2010 dönemi NCEP/NCAR tahminleyicileri havza ölçeğinde gözlenmiş olan veriler standardize edildikten sonra verilerin ilk yarısı kalibrasyonda kalan yarısı ise validasyonda kullanılmıştır. Şekil 2.1'deki şema içerisinde yer alan FFNN'nin gizli katman hücre sayısı (gkns) ve RBF'in gkns ve Gauss aktivasyon fonksiyonu yayılım parametresi σ kalibrasyon yani eğitim dönemi RMSE değeri minimum olacak şekilde belirlenmiştir. Modellerde aşırı öğrenmeyi engellemek amacıyla optimal jenerasyon büyüklükleriyle eğitimleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılmış olan iki adet makine öğrenmesi modelinin çıktıları BMA ile ağırlıklandırılırken Raftery vd. (2005) tarafından önerilmiş olan logaritmik-olabilirlik fonksiyonunun maksimizasyonu baz alınmıştır. Söz konusu işlemin basit analitik yöntemlerle gerçekleştirilmesi hayli güç olacağından bu kısımda E-M (expectation-maximization) algoritmasında ilişkin yöntem uygulanmıştır. Şekil 3.2'de sunulan NCEP/NCAR tahminleyici setleri akım değişkeni için kalibrasyonu yapılan hibrit modelleri ait kalibrasyon ve validasyon dönemi performansları Tablo 4.1'de verilmiştir. Tabloda modelleme sürecinde seçilen optimum parametreler ve Moriasi vd. (2007) kriterlerine göre performans sınamaları da ayrıca sunulmuştur.

Elde edilen bulgularda T_{ort} için kurulan ölçek indirgeme modellerinin kalibrasyon ve validasyon dönemlerinde bütün indislerde çok iyi (VG) sınıfında görünmektedir. Öte yandan, yağış (P) için kurulan ölçek indirgeme modelleri NS ve RSR indislerince iyi (G) olarak belirlenirken PBIAS indisi için VG sınıfında yer almışlardır. Kurulan modellere ait validasyon dönemi tahminlerine ait gidiş grafikleri ve saçılım diyagramları Şekil 4.1'de sunulmuştur. T_{ort} için elde edilen sonuçlar incelendiğinde daha tatmin edici sonuçlar gözlemlensede P için elde edilen sonuçların performanslarının göreceli düşük olması

değişkenin simüle edilebilmesindeki karmaşıklık göz önüne alındığında normal karşılanmaktadır. Hatta çalışmada edinilen performansların benzer iklim karakteristiğine sahip havzalarda vurgulananlarla benzer olduğu da ifade edilebilir (Fistikoglu ve Okkan 2011; Okkan ve Inan 2015a; Okkan ve Fistikoglu 2014). Sonuç olarak kurulan hibrit model yapıları GCM çıktılarının havza ölçeğine indirgenmesi aşamasında kullanılmasının güvenli boyutta olduğu bulunmuştur.

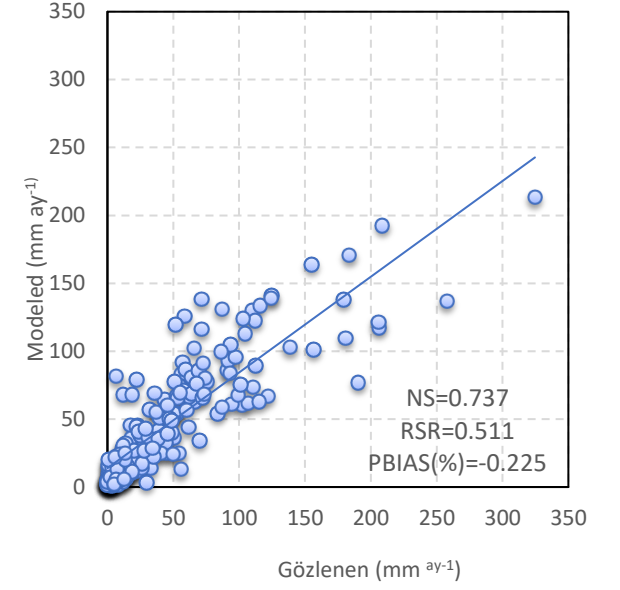
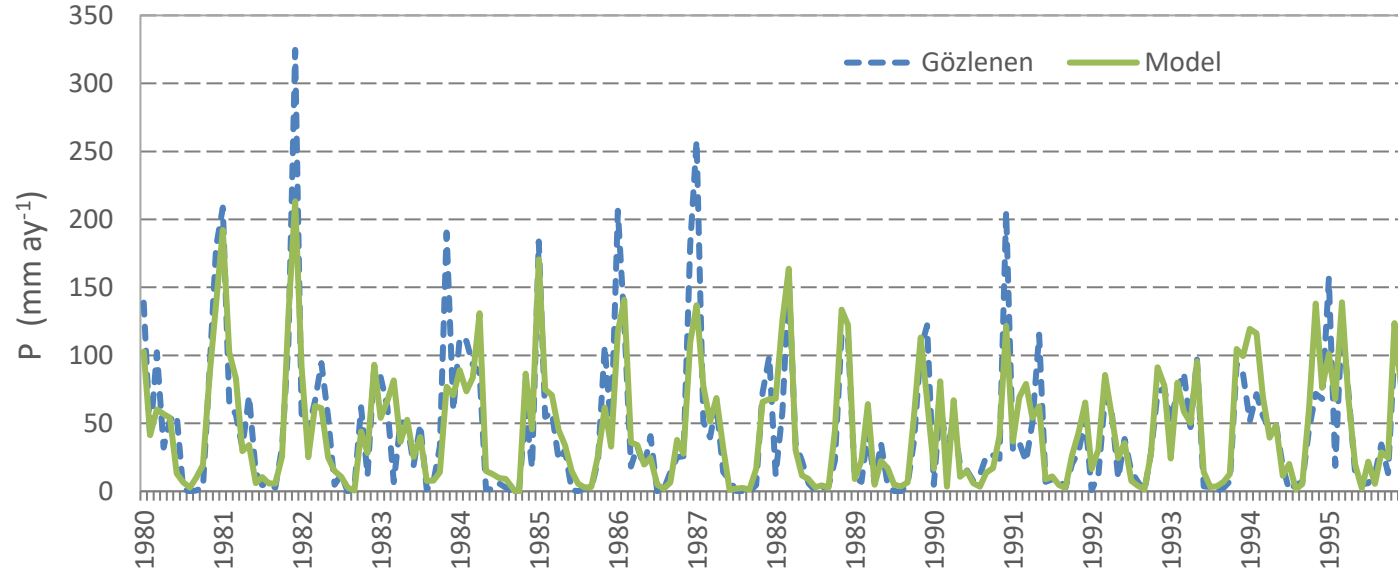


Tablo 4.1: Hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin kalibrasyon ve validasyon performansları.

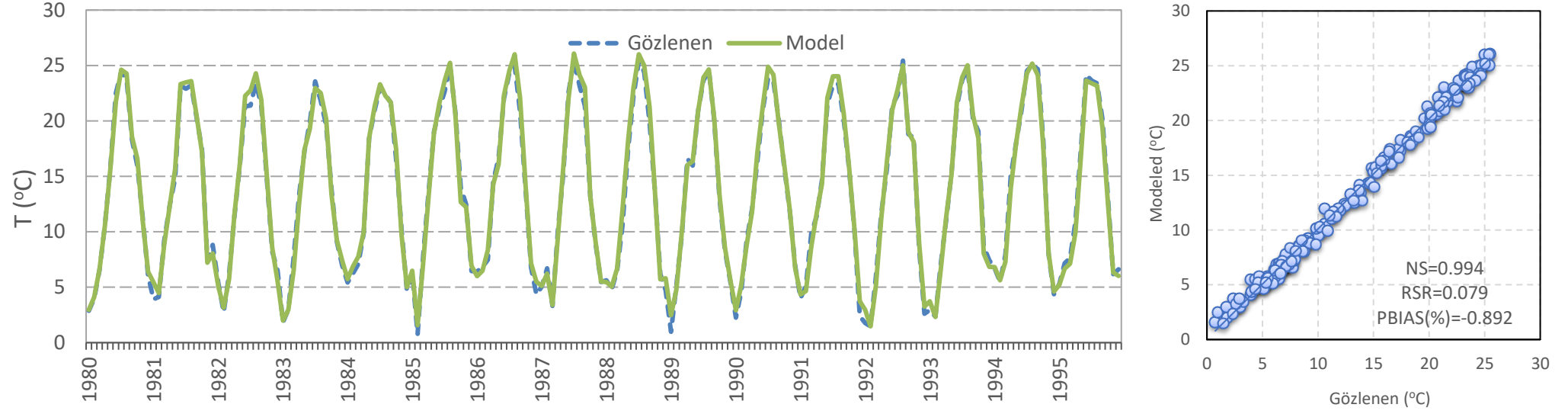
Hedef değişken	Havza	Eğitim			Validasyon		
		NS	RSR	PBIAS(%)	NS	RSR	PBIAS(%)
P	Gördes ^a	0.738 (G)	0.511 (G)	-0.226 (VG)	0.734(G)	0.514 (G)	-3.077 (VG)
T _{ort}	Gördes ^b	0.994 (VG)	0.079 (VG)	-0.892 (VG)	0.988 (VG)	0.107 (VG)	0.118 (VG)

^a FFNN için gkns=6, RBF için gkns=30, $\sigma=1.50$, BMA'da $W_{FFNN}=0.503$, $W_{RBF}=0.497$

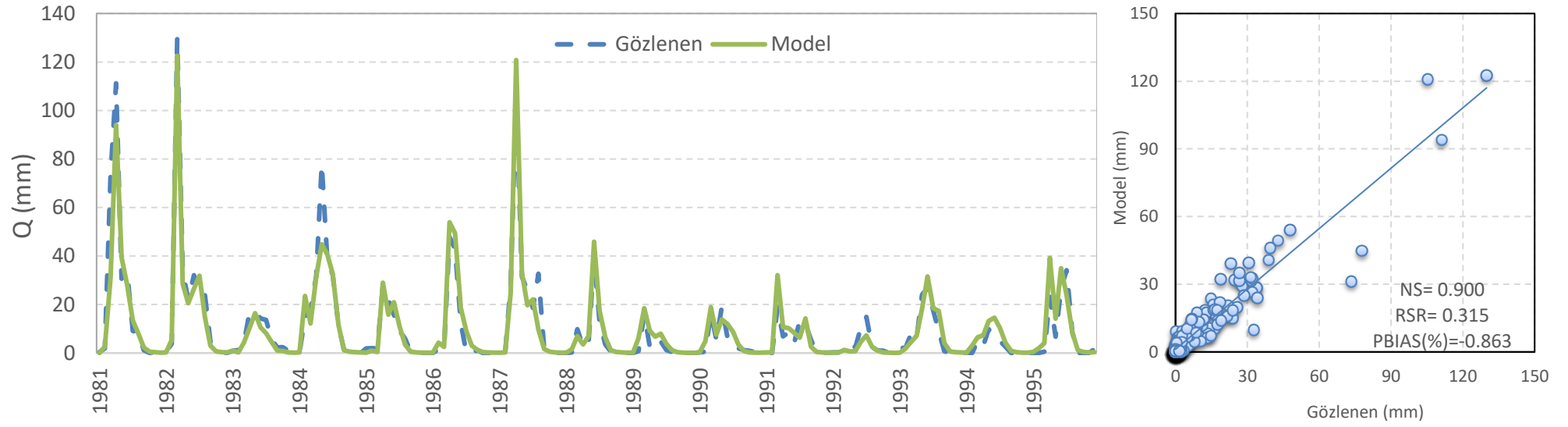
^b FFNN için gkns=10, RBF için gkns=15, $\sigma=3.30$, BMA'da $W_{FFNN}=0.534$, $W_{RBF}=0.4$



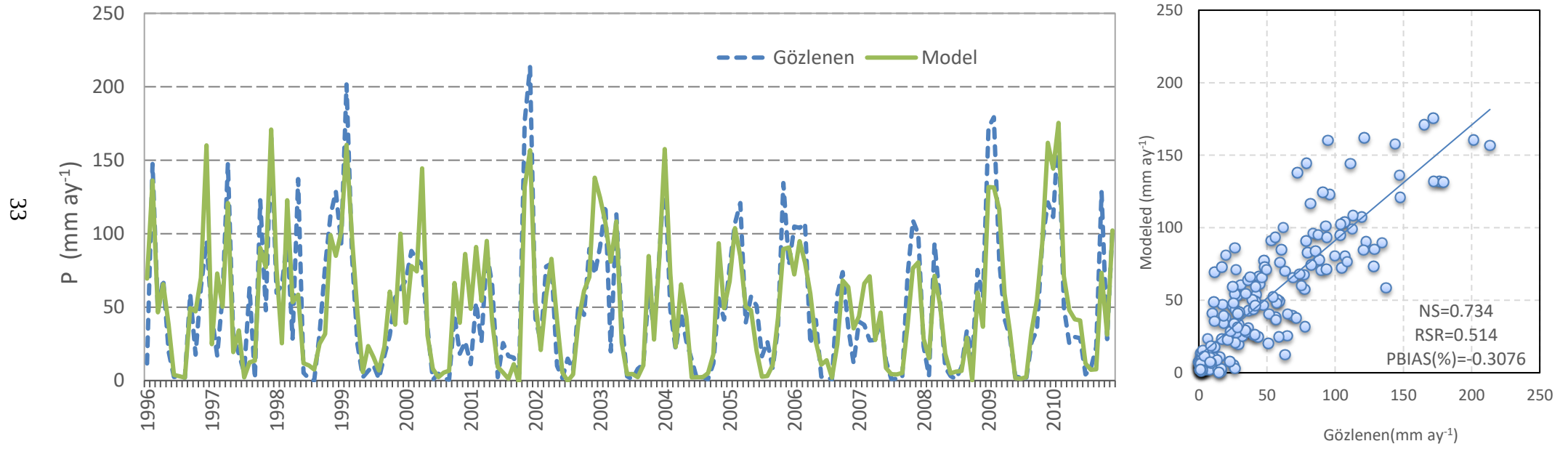
Şekil 4.1: Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin kalibrasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.



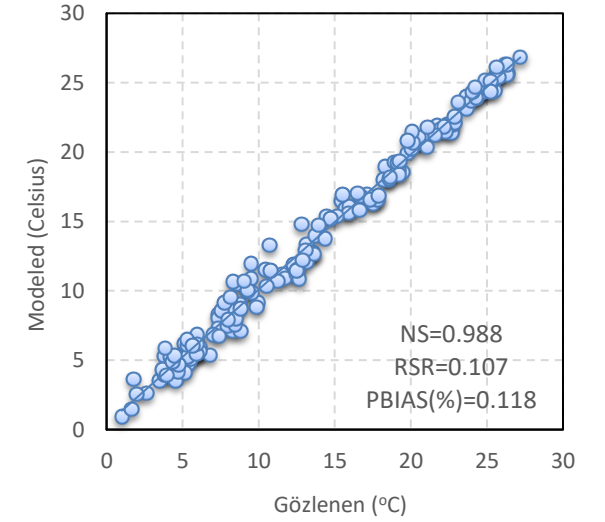
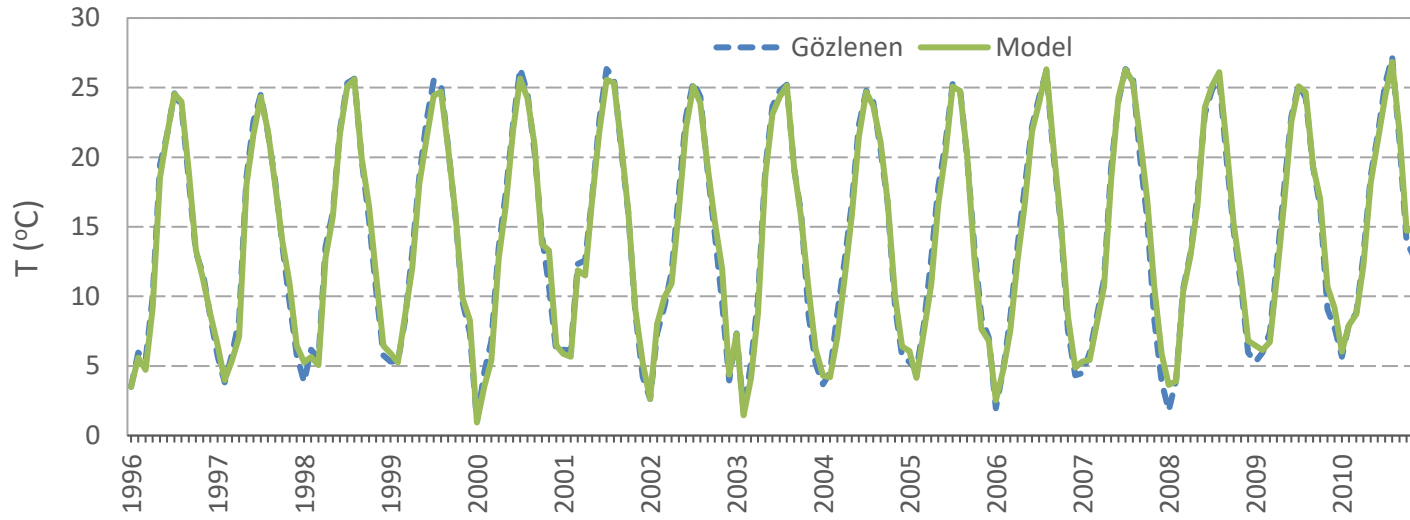
Şekil 4.1 (devamı): Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin kalibrasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.



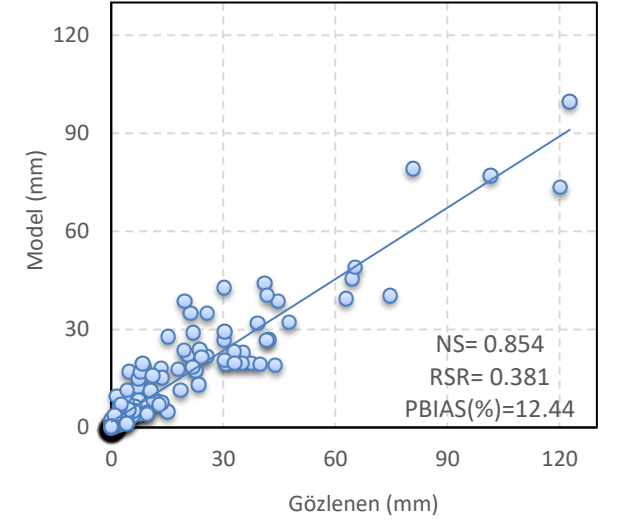
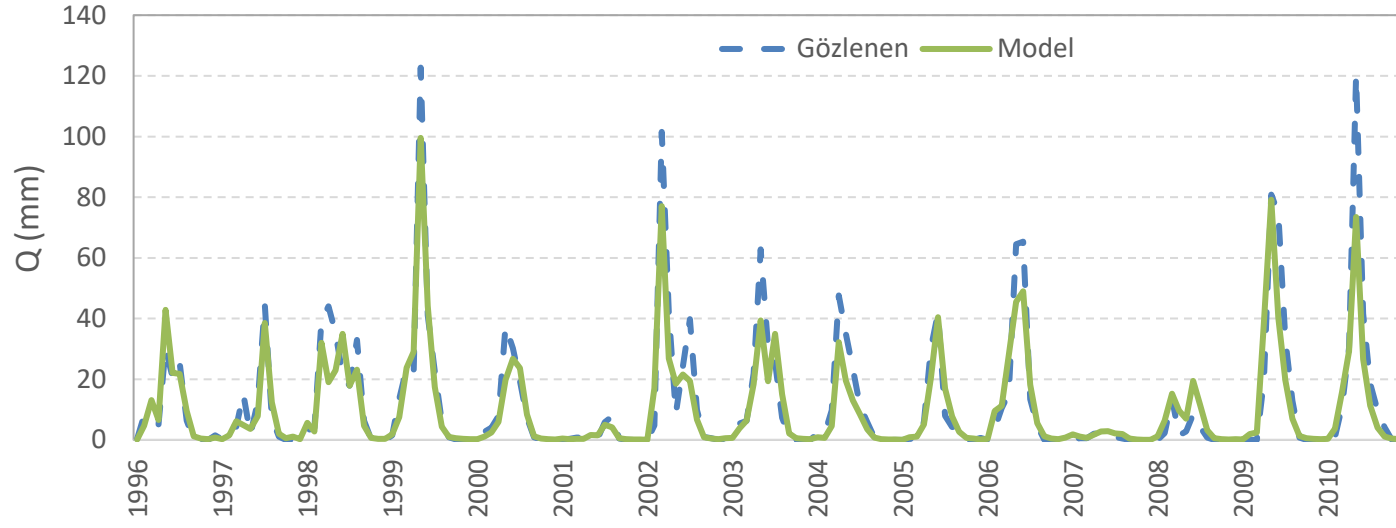
Şekil 4.1 (devamı): Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin kalibrasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.



Şekil 4.2: Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin validasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.



Şekil 4.2 (devamı): Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin validasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.



Şekil 4.2 (devamı): Gördes Havzasında uygulanan hibrit istatistiksel ölçek indirgeme modelinin validasyon dönemi tahminlerinin gözlemlere karşı zamansal gidişi ve saçılımı.

4.2 Hidrolojik Modellerin Kalibrasyon ve Validasyon Performansları

Girdi olarak alansal ortalama aylık yağış ve buharlaşma verilerine ihtiyaç duyan ve işleyişi Şekil 2.3’de gösterilen dynwbm ve abcde hidrolojik modelleri 1981-1995 su yıllarına ait gözlemler kullanılarak kalibre edilmiştir. Modeller başlangıç zemin nemi ve yeraltısuyu depolaması değerlerine çok hassas olmadığı için bu değerler deneme-yanılmayla seçilmişlerdir. Kalibrasyonlarda farklı optimizasyon algoritmaları denenmiş ve en küçük RMSE değerini veren parametre tahminleri hafızaya alınmıştır. Ardından ölçek indirgeme modellemesindeki işleyişe benzer biçimde hidrolojik modellerin çıktıları BMA kullanılarak E-M algoritması altında ağırlıklandırılmaları gerçekleştirilmiştir. Kavramsal modellerin parametrelerinin en iyi çözümleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Hidrolojik modelin kalibre edilen parametreleri.

abcde modeli parametreleri						dynwbm modeli parametreleri				
Havza	b(mm)	a	c	d	e	S_{max} (mm)	α_1	α_2	d	e
Gördes	212.470	0.963	0.487	0.057	0.648	266.943	0.622	0.721	0.857	0.770

Gördes Havzası için BMA ile elde edilen ağırlıklar gereği ansambl çıktıları (QBMA) üretirken kullanılan ifade Denklem 4.1’de sunulmuştur.

$$(QBMA = 0.535 \times Q_{abcde} + 0.465 \times Q_{dynwbm}) \quad (4.1)$$

Kalibrasyonu yapılan ve çıktıları BMA ile ağırlıklandırılan modellerin kalibrasyon ve validasyon dönemi (1996-2010 dönemi) sonuçları Tablo 4.3’te sunulmuştur

Tablo 4.3: BMA ile ağırlıklandırılmış model çıktılarından elde edilen eğitim ve validasyon dönemi performansları.

Kalibrasyon				Validasyon		
Havza	NS	RSR	PBIAS(%)	NS	RSR	PBIAS(%)
Gördes	0.900 (VG)	0.315 (VG)	-0.863 (VG)	0.854 (VG)	0.381 (VG)	12.436 (VG)

Derecelendirme yapılırken ölçek indirgeme modellemesinde olduğu gibi Moriasi vd. 2007 kriterleri baz alınmıştır. Kalibrasyon döneminde tüm indis değerleri oldukça tatmin edici çıkmış ve VG sınıfında modellemeye uygun çıkmıştır.

Validasyon dönemi çıktılarında kalibrasyon dönemi çıktılarına göre bir miktar azalma gözlemlensede NS ve RSR indisleri açısından modelleme sürecinin VG niteliğinde olduğu ifade edilebilir. Buna karşın PBIAS sonuçlarına göre validasyon dönemi simülasyonları kalibrasyon döneminden farklı olarak daha düşük tahminleme eğilimi göstermiştir. Bu durum görsel olarak Şekil 4.3'ten gözlemlenebilmektedir. Fakat yine de PBIAS indisinin G sınıfında yer alması olumlu olarak değerlendirilmiştir. Sonuç itibarıyla bir sonraki adımda simülasyon performansı başarılı görülen modeller aracılığıyla senaryo bazlı indirgenmiş ve yanlılıkları giderilmiş GCM çıktılarının akım projeksiyonlarına dönüştürülmesi sağlanmıştır.

4.3 Hidro-meteorolojik Projeksiyonların Elde Edilmesi

Bu kısımda ilk önce havza ölçeğine indirgenen yağış ve sıcaklık çıktıları yanlılıkları büyük ölçüde giderilmiştir. Bu bağlamda Bölüm 2.1'de söz edilen QDM algoritmasından yararlanılmıştır. QDM seçilen bir olasılık dağılım fonksiyonu altında çalıştırıldığından öncelikle verilere uygun dağılım fonksiyonu Anderson-Darling testi ile belirlenmiştir. Bu kapsamda, yağışlar için Gamma-2, ortalama sıcaklıklar için Normal dağılım uygunluğu altında QDM algoritması her ay için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Yöntemin işleyişi hakkında detaylar Cannon vd. (2015) çalışmasında mevcut olmakla birlikte Şekil 4.3'te Gördes Havzasına indirgenen HADGEM2-ES çıktılarının yanlılık düzeltme kısmı öncesi ve sonrasına ait dağılımlar sunulmuştur. Görüldüğü gibi QDM geçmiş dönemde standart kantil haritalama gibi uygulanmış ve referans senaryo çıktılarının dağılım özelliklerinin gözlenmiş verilere ait olanlarla eşleşmesi gözlenmiştir. Ayrıca ölçek indirgeme ile elde edilen RCP projeksiyonlarında belirlenen anomalilerin QDM işleyişinin ardından da azami ölçüde korunmaya çalışıldığı gözlemlenmiştir. Benzer gözlemler diğer GCM versiyonları için de yapılmıştır ve bu tarz yaklaşımlarla modelleme zincirinde GCM ve senaryo belirsizliğinin kısıtlanması mümkün olmaktadır (örn., Miao vd. 2016).

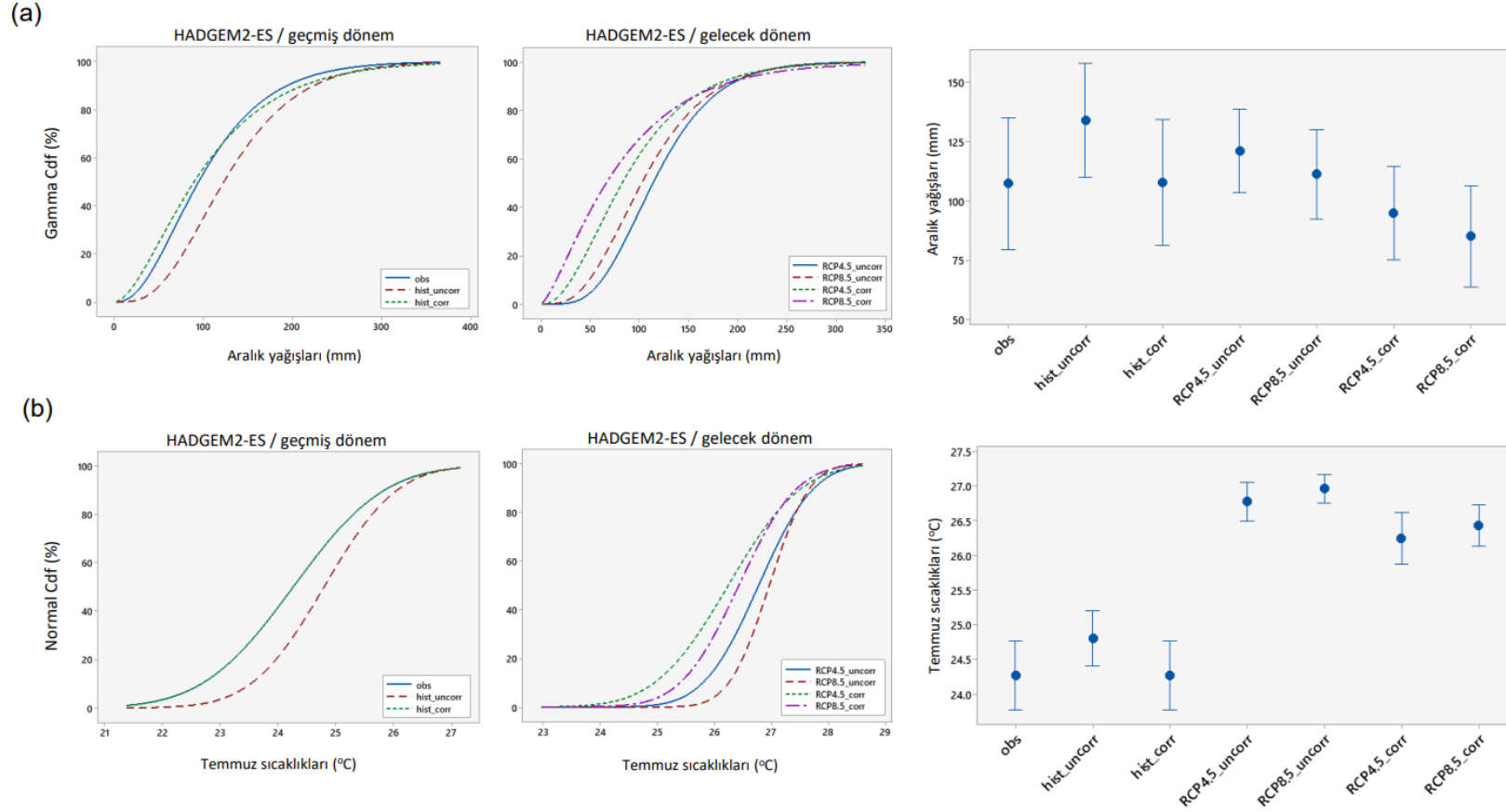
Ama yine de söz konusu belirsizliklerin tamamen yok edilemediğini ve her GCM'in kendine has anomaliler gösterdiğini söylemekte fayda vardır. QDM sonrasında her senaryo ve GCM bağlamında elde edilen ortalama sıcaklık tahminleri havzalarda kalibrasyonu

yapılan Kharrufa eşitliği ile tava buharlaşması tahminlerine dönüştürülmüştür. Ardından tahmini tava buharlaşmaları ve yağışlar kalibrasyon detayları Bölüm 4.2’de anlatılan hidrolojik modellere sunularak akım projeksiyonu (Q) üretimi aşamasına geçilmiştir. Hidrolojik modelde kullanılan bu çıktılar hazne işletme çalışması için gerekli net buharlaşma yüksekliklerinin hesabına da temel oluşturmuşlardır. Bu kademede kullanılacak tava katsayısı 0.6 ve 0.8 arasında değişkenlik gösterirken söz konusu değerin 0.7 alınması uygun görünmektedir (Yıldız ve Gurer 2014. RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için değişkenlerin projeksiyonlarında öngörülen rölatif değişimler Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4: Gördes Havzası için çeşitli değişkenlerin projeksiyonlarında öngörülen rölatif değişimler (ΔT , ΔP , ΔEP , ΔE_{net} ve ΔQ sırasıyla sıcaklık, yağış, tava buharlaşması, net buharlaşma ve hazneye giriş akımları ortalamalarındaki yüzde değişimleri temsil etmektedir).

	ΔT (°C)	ΔP (%)	ΔEP (%)	ΔE_{net} (%)	ΔQ (%)
RCP 4.5	1.693	-0.112	14.894	18.737	-9.044
	↑		↑	↑	
RCP 8.5	2.040	-4.266	17.585	20.782	-24.011
	↑		↑	↑	↓

Anlamli olmayan değışimler
 Anlamli artış
 Anlamli azalış

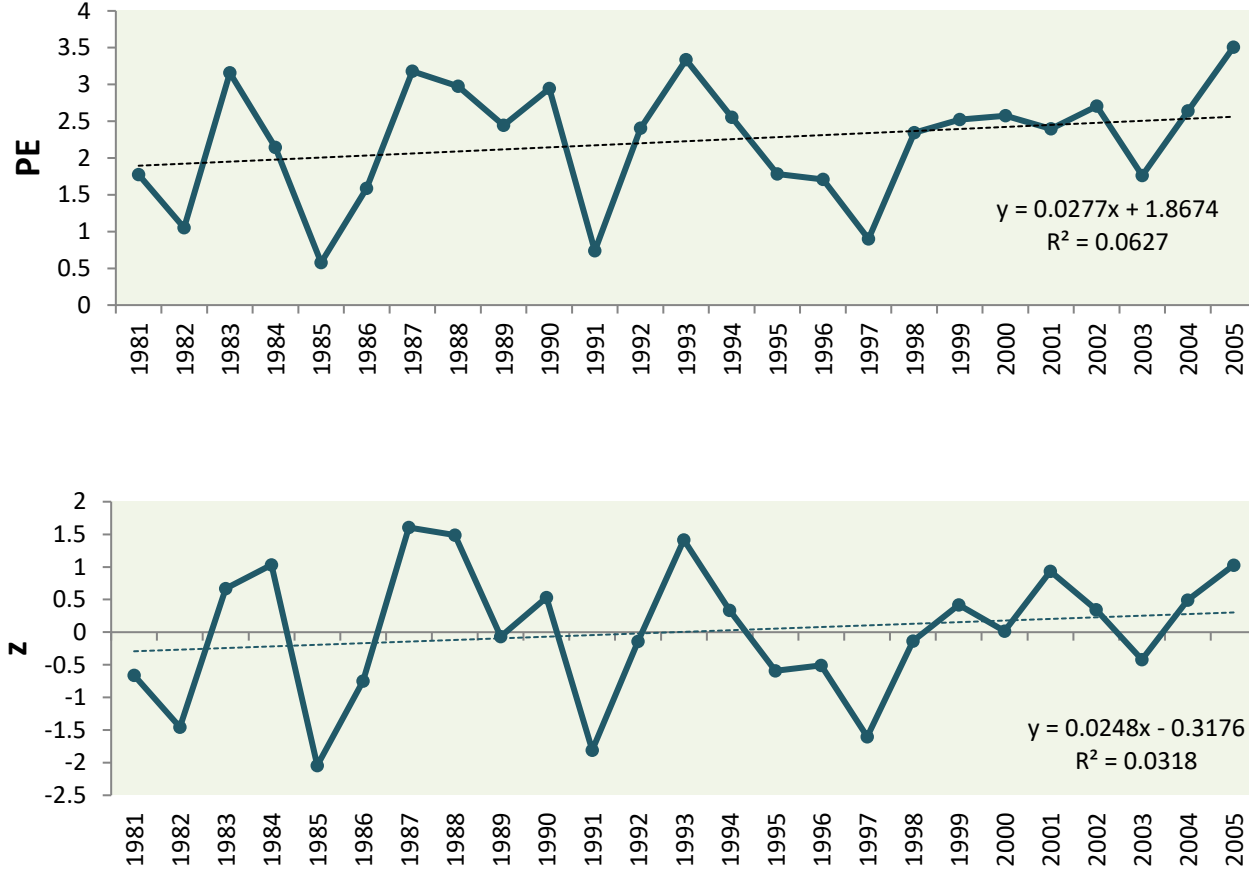


Şekil 4.3: Gördes Havzası HADGEM2-ES senaryo çıktılarının yanlılık düzeltme işlemi öncesi ve sonrası dağılımları: (a) Aralık ayı toplam yağışları için değerlendirme, (b) Temmuz ayı ortalama sıcaklıkları için değerlendirme (obs gözlemleri, corr ve uncorr alt indisleri sırasıyla düzeltilmiş ve düzeltilmemiş varyasyonları göstermektedir. İlk ve ikinci sütun grafikleri sırasıyla referans dönem ve 2021-2050 dönemi ampirik eklenik dağılım fonksiyonu değerleri ile oluşturulmuştur. Son sütundaki gösterimler ise ortalamanın %95 güven aralıklarını temsil etmektedir).

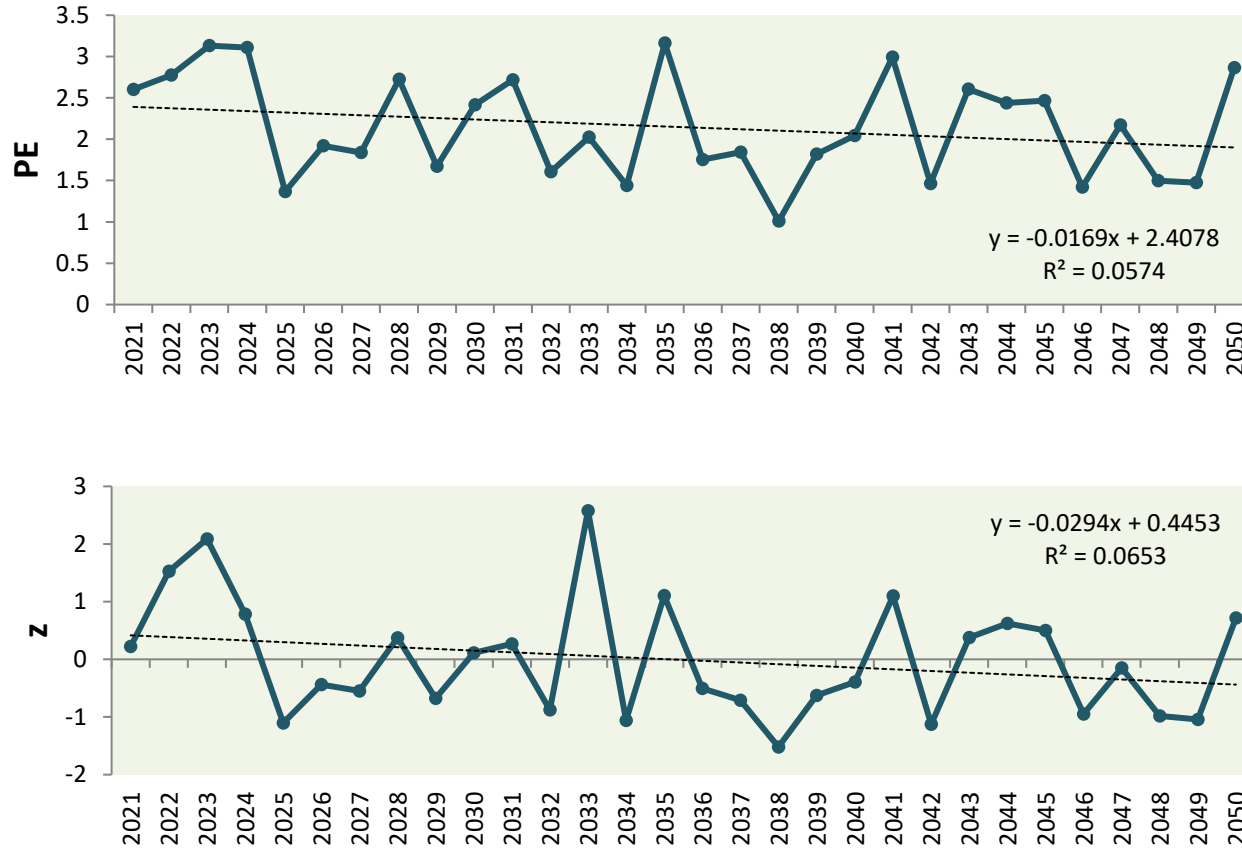
4.4 Kuraklık İndislerinin Performansları

Tez çalışmasında tüm su dönemleri için ortalama akımlar elde edildikten sonra su yıllarına gözetilerek derlenmiş söz konusu su dönemine ait ortalama akım verileri bölüm 2.4'te açıklanmış olan SRI ve PE yöntemlerinde kullanılmıştır. Gördes havzası için hist, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için SRI (z değerleri) ve PE değerleri hesaplanmış ve 1981-2010 su yılları boyunca gidiş grafikleri Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur. Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de açıklandığı gibi z ve PE değerlerindeki azalma sonucu kuraklık şiddeti artmaktadır. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulan grafiklerdeki doğrusal trend çizgilerinin iki yöntem için de negatif eğimde olması kuraklık şiddetinin zamanla arttığını göstermektedir.

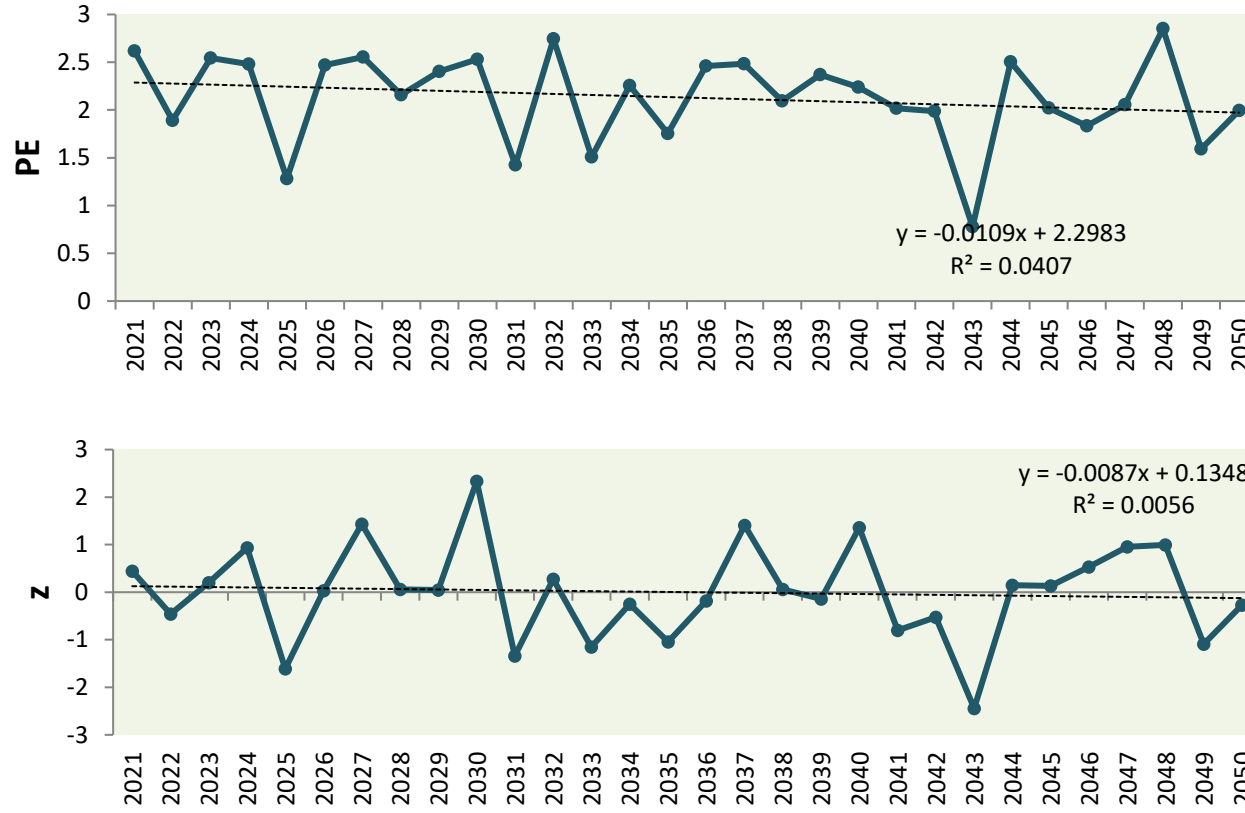
Kuraklık şiddetlerinin yıllara göre test etmekle beraber Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'e göre kurak, sulak ve normal olan periyotların toplam üzerindeki etkinlik payları da incelenmiştir. Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de açıklanan kategoriler kısmen farklı derecelendirildiğinden SRI indisindeki S1, S2, S3 toplamı, PE indisindeki ŞS, S, YS toplamı iken SRI'deki K1, K2, K3, K4 toplamı PE'deki YK, K, ŞK toplamı olacak şekilde varsayım yapılmıştır. Kuraklık şiddetlerine ait farklı kategoriler için hesaplanan yüzdesel dağılımlar aşağıda pasta grafik şeklinde sunulmuştur.



Şekil 4.4: Hist senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.



Şekil 4.5: RCP 4.5 senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.

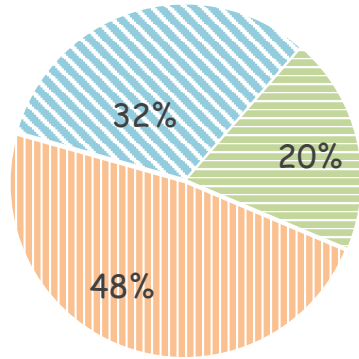


Şekil 4.6: RCP 8.5 senaryosu için hesaplanmış SRI ve PE değerlerinin zaman içindeki değişimi.



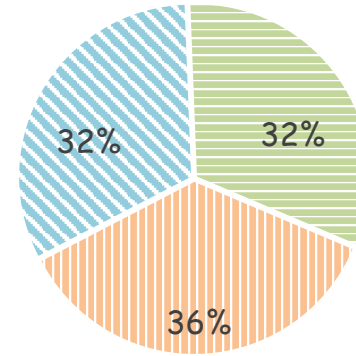
SAI

kurak normal sulak



PE

kurak normal sulak

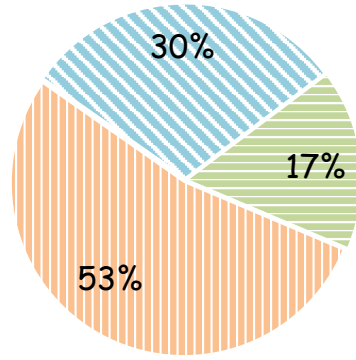


Şekil 4.7: Hist senaryosu için farklı iklim özellikli periyot etkinliklerinin SRI ve PE ölçütlerine göre karşılaştırılması.



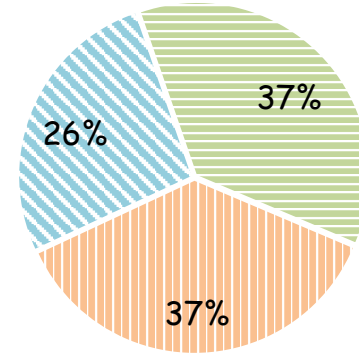
SAI

kurak normal sulak

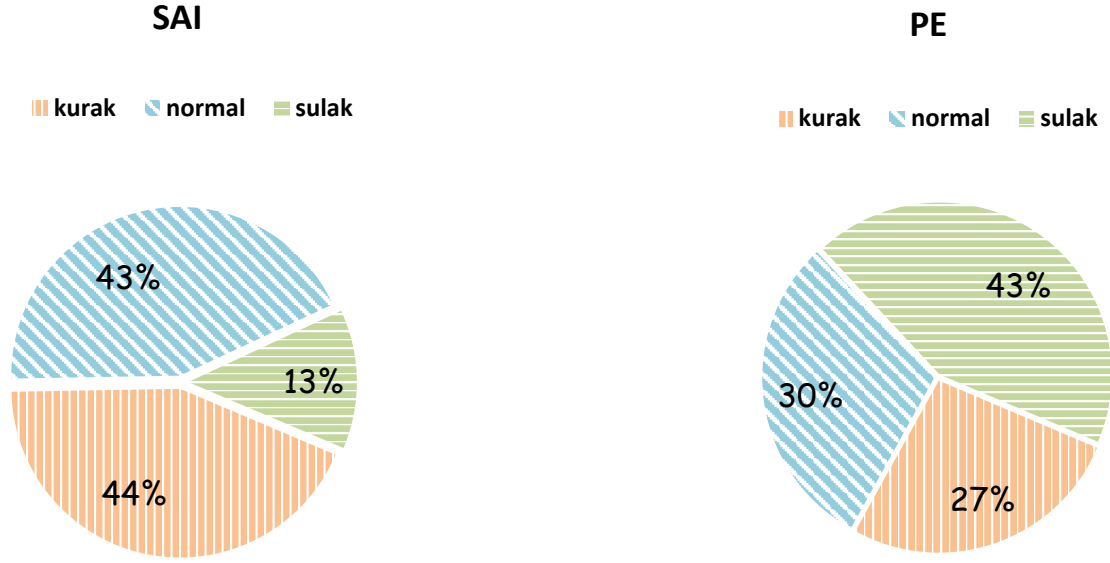


PE

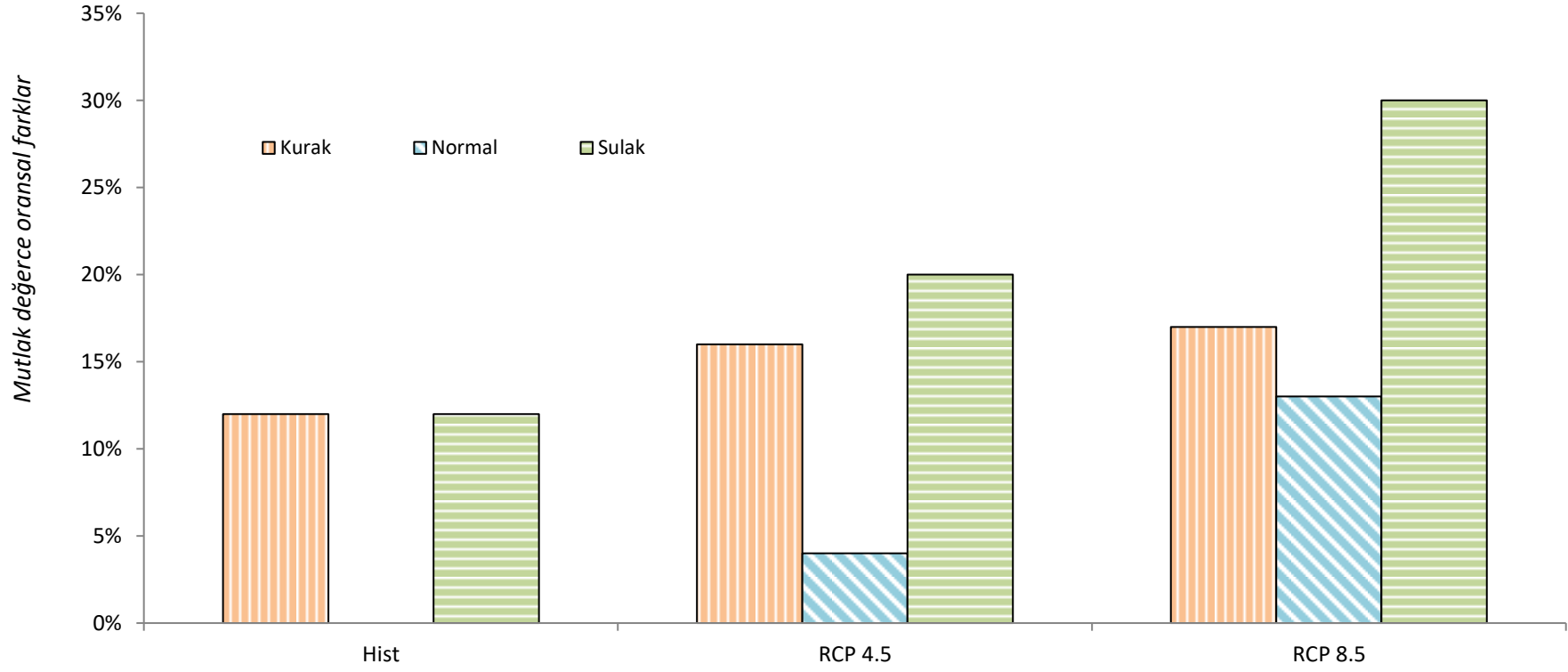
kurak normal sulak



Şekil 4.8: RCP 4.5 senaryosu için farklı iklim özellikli periyot etkinliklerinin SRI ve PE ölçütlerine göre karşılaştırılması.



Şekil 4.9: RCP 8.5 senaryosu için kurak, normal ve sulak periyot etkinliklerinin SRI ve PE yöntemlerine göre karşılaştırılması.



Şekil 4.10: SRI ve PE yöntemleriyle hesaplanan kurak, normal ve sulak periyotlarının mutlak farklarının senaryolara göre değişimi.

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüleceği üzere kullanılan iki yöntem en fazla sulak dönemde değişkenlik göstermiştir. Sulak periyot uzunlukları için hesabı yapılan mutlak farkların senaryolar arası ortalaması %21 civarlarındadır. Normal dönem uzunlukları için hesaplanmış olan mutlak farkların senaryolar arası ortalaması %6, kurak dönem içinse %15 mertebelerindedir. Standardize akım indeksinin çoğunlukla atfedilen bir indeks olduğu göz önüne alındığında, PE yönteminin alternatif olarak kullanılmasının çok sağlıklı olmayacağı düşünülmektedir.

SRI indisi baz alındığında kurak, normal ve sulak dönemlerin 1981-2005 döneminde sırayla %48, %32 ve %20 oranında olduğu saptanmıştır. Öte yandan kurak dönemdeki etkinlik oranlarının senaryolar arası değişkenlik katsayısı %10, normal ve sulak dönemdeki etkinlik oranlarının senaryolar arası değişkenlik katsayıları ise sırayla %21 ve %20 olarak hesaplanmıştır. Tez çalışmasında standardize akım indeksi göz önüne alındığında sulak ve kurak dönemlerin alt kategorileri de incelenmiş, S1 olarak nitelendirilen çok şiddetli sulak dönem, tüm senaryolarda neredeyse hiç görülmemiştir. Şiddetli sulak olarak atfedilen S2 ve orta şiddetli sulak olarak sembolize edilen S3 ise hemen hemen aynı şekilde seyretmiştir. Ayrıca çok şiddetli ve şiddetli kurak (K4 ve K3) dönemlerinin senaryolar bazında etkinliğinin yaklaşık %4 olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte normale yakın kurak olarak nitelendirdiğimiz K1’in çoğunluk gösterdiğini söyleyebiliriz. Sözü edilen bulguların yanı sıra Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’de sunulan eğilim çizgilerinin, ileride iklim değişikliği ile birlikte giderek belirginleşeceği düşünülürse, K1, K3 ve K4 kategorisindeki kuraklıkların genel anlamda etkinliklerinin artması mecburi olacaktır.

5. SONUÇLAR

Gelecekte havzaların iklim değişikliğiyle beraber sergileyeceği davranışları öngörmek amacıyla GCM ve havza hidrolojisi modelleri gibi önemli araçlar kullanılmaktadır. Söz konusu araçların birlikte kullanımıyla tahminlenen hidro-meteorolojik projeksiyonların baraj haznelerindeki talep açığı oluşturma potansiyelleri sosyo-ekonomik kuraklık ölçütü olarak değerlendirilmektedir (Ayantobo vd. 2017). Tez çalışması kapsamında GCM-RCP entegrasyonu ile elde edilen performans ve çıktılar ışığında kuraklık analizi yapılması amaçlanmıştır. Bu amaca istinaden GCM-RCP entegrasyonu yapmak için alansal ortalama yağış ve sıcaklık tahminlerini hesaplayabilmek için IPCC'nin yayımladığı 5. Değerlendirme Raporu'nda (AR5) yer alan iklim senaryoları ve bahsi geçen senaryolar altında çalıştırılan farklı CMIP5 iklim modelleri içerisinde HadGEM2-ES değerlendirilmiştir. Bu GCM'e ait kaba alansal çözünürlüklü çıktılar (P ve Tort) yerel ölçeğe indirgenmiştir. Yerel ölçeğe indirgenen bu çıktılar ile iki farklı yağış akış modeli kullanılarak akım projeksiyonları elde edilmiştir. Sonuç olarak bu akım projeksiyonları ile yine iki farklı kuraklık indisi kullanılarak sına yapılmıştır.

Ölçek indirgeme aşamasında sına indislerine ait sonuçlar incelendiğinde Tort için elde edilen performanslar P için elde edilen performanslara nazaran daha tatmin edici sonuçlar vermiştir fakat P'nin simüle edilmesindeki karmaşıklık düşünüldüğünde normal karşılanmıştır. Sonuç olarak kurulan hibrit model yapıları GCM çıktılarının havza ölçeğine indirgenmesi aşamasında kullanılmasının güvenli boyutta olduğu bulunmuştur.

Akım projeksiyonlarının hesaplanması aşamasındaki hidrolojik modelleme kısmında modellerin kalibre edilmesi uygun görülmüştür. Bu doğrultuda BMA ile elde edilen ağırlıklar ansambl (QBMA) kullanılarak kalibre edilmiştir. Derecelendirme yapılırken ölçek indirgeme modellemesinde olduğu gibi Moriasi vd. 2007 kriterleri baz alınmıştır. Kalibrasyon döneminde tüm indis değerleri oldukça tatmin edici çıkmış ve VG sınıfında modellemeye uygun çıkmıştır. Validasyon dönemi çıktılarına kalibrasyon dönemi çıktılarına göre bir miktar azalma gözlemlense de NS ve RSR indisleri açısından modelleme sürecinin VG niteliğinde olduğu ifade edilebilir. Sonuç itibarıyla bir sonraki adımda simülasyon performansı başarılı görülen modeller aracılığıyla senaryo bazlı

indirgenmiş ve yanlışlıkları giderilmiş GCM çıktılarının akım projeksiyonlarına dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Hidro-meteorolojik projeksiyonların elde edilmesi aşamasında ilk önce havza ölçeğine indirgenen yağış ve sıcaklık çıktıları yanlışlıkları QDM algoritması kullanılarak büyük ölçüde giderilmiştir. Ölçek indirgeme ile elde edilen RCP projeksiyonlarında belirlenen anomalilerin QDM işleyişinin ardından da azami ölçüde korunmaya çalışıldığı gözlemlenmiştir. Belirsizliklerin tamamen yok edilemediğini ve her GCM'in kendine has anomaliler gösterdiğini söylemekte fayda vardır.

Amaçlandığı gibi kuraklık analizi kısmında Standardize Akım İndeksi (SRI) ve Paylaştırılmış Entropi (PE) yöntemleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Tüm senaryolar için uygulanan kuraklık analizleri sonucu bulgular kısmındaki grafiklerle de desteklenen iki kuraklık yöntemi arasında bir tutarsızlık olduğu saptanmıştır. Kullanılan iki yöntem en fazla sulak dönemde değişkenlik göstermiştir. Sulak periyot uzunlukları için hesabı yapılan mutlak farkların senaryolar arası ortalaması %21 civarlarındadır. Standardize akım indeksinin çoğunlukla atfedilen bir indeks olduğu göz önüne alındığında, PE yönteminin alternatif olarak kullanılmasının çok sağlıklı olmayacağı düşünülmektedir. SRI yöntemi kuraklık analizi için referans bir teknik kabulü yapılırsa, PE yaklaşımının Gördes Havzası akımları bazında tutarlı olmadığı görülmektedir. Bu tespitin benzerleri Susurluk akımları için Okkan ve Altun, (2019) ve Kuzey Ege havzası yağışları için Bacanlı vd. (2017) çalışmalarında yapılmıştır.

SRI indisi referans olarak kabul edildiğinde kurak dönem etkinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca sulak ve kurak dönemlerin alt kategorileri de incelenmiş, S1 olarak nitelendirilen çok şiddetli sulak dönem, tüm senaryolarda neredeyse hiç görülmemiştir. Şiddetli sulak ve orta şiddetli sulak periyotlar ise benzer karakteristikler göstermiştir. Ayrıca çok şiddetli ve şiddetli kurak (K4 ve K3) dönemlerinin senaryolar genelinde etkinliğinin yaklaşık %4 olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte normale yakın kurak olarak nitelendirdiğimiz K1'in çoğunluk gösterdiğini söyleyebiliriz. Sözü edilen bulgular göz önüne alındığında K1, K3 ve K4 kategorisindeki kuraklıkların genel anlamda etkinliklerinin artması mecburi olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abramowitz, M. ve Stegun, I. A. (1965). Handbook of mathematical functions, with formulas, graphs, and mathematical tables. *Dover Publications*, Dover.
- Adams, H. D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, G. A., Villegas, J. C., Breshears, D. D., Zou, C. B. and Huxman, T. E. (2009). Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(17), 7063–7066.
- Anandhi, A., Srinivas, V. V., Nanjundiah, S. R. and Kumar, N. D. (2008). Downscaling precipitation to river basin in India for IPCC SRES scenarios using support vector machine. *International Journal of Climatology*, 28, 401-420.
- Bacanlı Ü. G., Dikbas F. ve Baran T. (2013, Eylül). Kuraklık analizinde entropi yöntemi. *VII. Ulusal Hidroloji Kongresi*, Isparta, Türkiye, 26-27.
- Bacanlı, Ü G., Baran, T. ve Dikbaş, F. (2017). Applicability of apportionment entropy as a drought index, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(3), 232-237. doi:10.5505/pajes.2016.80664
- Barret, J. P. (1974). Coefficient determination-some limitations. *The American Statistics*, 28 (1).
- Broomhead, D. and Lowe, D. (1988). Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks, *Complex Systems*, 2, 6, 568-576.
- Budyko, M. I. (1958). The Heat Balance of the Earth's Surface, *US Department of Commerce*, Washington, DC, USA.
- Burger, G. (1996). Expanded downscaling for generating local weather scenarios. *Climate Research*, 7, 111-128.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., and Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?, *Journal of Climate*, 28(17), 6938– 6959.
- Carsten, M., Morton, C., Ralf, K., Gunter, M., Harry, V. and Frank, W. (2008). Modeling the water balance of a mesoscale catchment basin using remotely sensed land cover data. *Journal of Hydrology*, 353, 322–334.
- Chen, X. and Chen, Y. Q. (2001) Downscaling of daily precipitation using a stochastic weather generator. *Journal of Hydraulic Engineering*, 4, 47–52.

- Chen, Y. D., Chen, X., Xu, C-Y. and Shao, Q. (2006). Downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator for the subtropical region in South China. *Hydrology and Earth System Sciences (Discussion)*, 3, 1145–1183.
- Crane, R. G. and Hewitson, B. C. (1998). Doubled CO₂ precipitation changes for the Susquehanna basin: downscaling from the GENESIS general circulation model. *International Journal of Climatology*, 18, 65-76.
- Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Tüvan, A. ve Akçakaya, A. (2014, Ekim). Climate change projections for Turkey with new scenarios, *The Climate Change and Climate Dynamics Conference-2014 – CCCD2014*, 8-10, İstanbul, Türkiye
- Dibike, Y. B. and Coulibaly, P. (2006). Temporal neural networks for downscaling climate variability and extremes. *Neural Networks*, 19(2), 135–144.
- Dogan, S., Berktaş, A. and Singh, V. P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470, 255–268.
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T. and Murray, D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters*, 38, L06702. <https://doi.org/10.1029/2010GL046582>.
- Duan, Q., Ajami, N. K., Gao, X. and Sorooshian, S. (2007). Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in Water Resources*, 30(5), 1371-1386.
- Fıstıkoğlu, O. and Okkan, U. (2011). Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtali River Basin in Turkey, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157-164.
- Fink, A. H., Brücher, T., Krüger, A., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G. and Ulbrich, U. (2004). The 2003 European summer heatwaves and drought-synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, 59(8), 209–216. <https://doi.org/doi:10.1256/wea.73.04>.
- Fistikoglu, O. and Okkan, U. (2011) Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtali River basin in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157-16
- Gardner, M. W. and Dorling, S. R. (1998). Artificial neural networks (the multi layer perceptron)-A review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, 32, 2627–2636.

- Ghosh, S. and Mujumdar, P. P. (2007). Nonparametric methods for modeling GCM and scenario uncertainty in drought assessment. *Water Resources Research*, 43, W07405. <https://doi.org/10.1029/2006WR005351>.
- Greve, P. and Seneviratne, S. I. (2015). Assessment of future changes in water availability and aridity. *Geophysical Research Letters*, 42, 5493–5499. <https://doi.org/10.1002/2015GL064127>.
- Griffin, D. and Anchukaitis, K. J. (2014). How unusual is the 2012–2014 California drought? *Geophysical Research Letters*, 41, 9017–9023. <https://doi.org/10.1002/2014GL062433>.
- Ham, F. and Kostanic, I. (2001). Principles of Neurocomputing for Science and Engineering, *Macgraw-Hill*, USA.
- Hao, Z. and Singh, V. P. (2011). Entropy-based method for bivariate drought analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, 780–786.
- Heim, R. R. Jr. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149.
- Hejazi, M. I., Cai, X. and Ruddell, B. L. (2008). The role of hydrologic information in reservoir operation—learning from historical releases. *Advances in Water Resources*, 31(12), 1636–1650.
- Hocking, R. R. (1976). The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. *Biometrics*, 32.
- Hong, X., Guo, S., Xiong, L. and Liu, Z. (2015). Spatial and temporal analysis of drought using entropy-based standardized precipitation index: A case study in Poyang Lake basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3–4), 543–556.
- Huth, R. (1999). Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors. *Climate Research*, 13(2), 91–101.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. and Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis Project. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 77(3), 437–472.
- Karamouz, M., Fallahi, M., Nazif, S., and Farahani, M. R. (2009). Long lead rainfall prediction using statistical downscaling and artificial neural network modeling. *Scientia Iranica (Transacation A: Civil Engineering)*, 16(2), 165–172.
- Katz, R. W. (1996). Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios. *Climatic Change*, 32, 237–255.

- Katz, R.W. and Parlange, M. B. (1998). Overdispersion phenomenon in stochastic modeling of precipitation. *Journal of Climate*, 11, 591-601.
- Kawachi, T., Maruyama, T., and Singh, V. P. (2001). Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*, 246(1-4), 36-44. doi:10.1016/S0022-1694(01)00355-9
- Koutsoyiannis, D. and Montanari, A. (2007). Statistical analysis of hydroclimatic time series: Uncertainty and insights. *Water Resources Research*, 43, W05429.
- Labat, D. (2010). Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *Journal of Hydrology*, 385, 269–278.
- Landman, W. A., Mason, S. J., Tyson, P. D. and Tennant, W. J. (2001). Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow. *Journal of Hydrology*, 252 (1–4), 221–236.
- Li, S., Xiong, L., Li, H. Y., Leung, L. R. and Demissie, Y. (2016). Attributing runoff changes to climate variability and human activities: uncertainty analysis using four monthly water balance models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(1), 251-269.
- Liao, Y. M., Zhang, Q. and Chen, D. L. (2004). Precipitation simulation in China with a weather generator. *Acta Geographica Sinica*, 59(5), 689–698
- Lin, G. F. and Chen, L. H. (2004). A non-linear rainfall-runoff model using radial basis function network. *Journal of Hydrology*, 289(1-4), 1-8.
- Linderson, M. L., Achberger, C. and Chen, D. (2004). Statistical downscaling and scenario construction of precipitation in Scania. southern Sweden, *Hydrology Research*, 35(3), 261- 278.
- Lindley, D. V. (1987). Regression and correlation analysis. *New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 4, 120-23.
- Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C. N., Yong, B., Shafer, M. A., Riley, R. and Hocker, J. E. (2012). Hydro-Climatological Drought Analyses and Projections Using Meteorological and Hydrological Drought Indices: A Case Study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resources Management*, 26(10), 2761-2779. doi:10.1007/s11269-012-0044-y
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592.

- Lorenz, E. N. (1969). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 636-646.
- MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, 1, 281-297.
- Maruyama, T., Kawachi, T. and Singh, V. P. (2005). Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), 104-113. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.11.020
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales. *American Meteorological Society, 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 Janvier, Anaheim, 179-184.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, J. F., vd. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213-241.
- MetOffice, Met Office climate prediction model: HadGEM2 family, Last updated: 24 April 2014, <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2>
- Miao, C., Su, L., Sun, Q. and Duan, Q. (2016). A nonstationary bias-correction technique to remove bias in GCM simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10), 5718- 5735.
- Mishra, A. K. and Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202–216.
- Mo, K. C. and Schemm, J. E. (2008). Droughts and persistent wet spells over the United States and Mexico. *Journal of Climate*, 21(5), 980–994.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Murphy, J. M. (1999). An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, 12, 2256-2284.
- Najafi, M. R., Moradkhani, H. and Wherry, S. A. (2011). Statistical downscaling of precipitation using machine learning with optimal predictor selection. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(8), 650-664.

- Okkan, U. (2009). Aylık yağış ve sıcaklık değişimlerinin izmir içmesuyu havzalarının akımlarına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, Türkiye.
- Okkan, U. (2015). Dinamik Su Bütçesi Modeli. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 70-82.
- Okkan, U. and Fistikoglu, O. (2012). Downscaling of precipitation to Tahtali watershed in Turkey for climate change scenarios. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*.
- Okkan, U. and Kırdemir, U. (2018). Investigation of the Behavior of an Agricultural-Operated Dam Reservoir Under RCP Scenarios of AR5-IPCC. *Water Resources Management*, 32(8), 2847– 2866.
- Okkan, U. and Kırdemir, U. (2016). Downscaling of monthly precipitation using CMIP5 climate models operated under RCPs. *Meteorological Applications*, 23(3), 514-528.
- Okkan, U. and Kırdemir, U. (2020). Towards a hybrid algorithm for the robust calibration of rainfall– runoff models. *Journal of Hydroinformatics*, 22(4), 876-899.
- Okkan, U. and Kıymaz, H. (2020). Questioning of empirically derived and locally calibrated potential evapotranspiration equations for a lumped water balance model. *Water Supply*, 20(3), 1141- 1156.
- Okkan, U. ve Altun, A. (2019). Susurluk Havzası Akımlarının Hidrolojik Kuraklık Analizinde Standardize Akım İndeksi ve Paylaştırılmış Entropi Yöntemlerinin Kıyaslanması. *4 th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences*. <https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.084>.
- Okkan, U. ve Mollamahmutoğlu, A. (2010). Çoruh Nehri günlük akımlarının yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (3), 251-261.
- Okkan, U., Fıstıkoğlu, O., Ersoy, Z. B. ve Noori, A. T. (2022). Parametrik İşletme Kuralları ile İklim Değişikliği Senaryoları Altında Hazne İşletme Optimizasyonu. *TÜBİTAK proje raporu*, proje no: 121Y037.
- Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları. *Papatya Yayıncılık*, İstanbul.
- Palutikof, J. P., Goodess, C. M., Watkins, S. J. and Holt, T. (2002). Generating rainfall and temperature scenarios at multiple sites, examples from the Mediterranean. *Journal of Climate*, 15, 3529-3548.

- Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R. and Hagemann, S. (2014). Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3262–3267.
- Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F. and Polakowski, M. (2005). Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155-1174.
- Rumelhart D. E., Hinton G. E. and Williams R. J. (1986). Learning representations by backpropagation errors. *Nature*, 323, 533-536.
- Sang, Y. F. (2012). Spatial and temporal variability of daily temperature in the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 112(1), 12–24.
- Sang, Y. F., Singh, V. P., Wen, J. and Liu, C. (2015). Gradation of complexity and predictability of hydrological processes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 5334–5343. <https://doi.org/10.1002/2014JD022844>.
- Sankarasubramanian, A. and Vogel, R. M. (2002). Annual hydroclimatology of the United States. *Water Resources Research*, 38(6), 19.
- Schoof, J. T., Pryor, S. C. and Robeson S. M. (2007). Downscaling daily maximum and minimum temperatures in the midwestern USA: a hybrid empirical approach. *International Journal of Climatology*, 27 (4), 439–454.
- Shahid, M., Cong, Z. and Zhang, D. (2018). Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: a case study of the Soan River basin, Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1), 205-219.
- Sheffield, J., Wood, E. F. and Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435–438. <https://doi.org/10.1038/nature11575>.
- Shukla, S. and Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2). doi:10.1029/2007gl032487.
- Singh, V. P. (2015). Entropy Theory in Hydrologic Science and Engineering. New York: McGraw-Hill Education.
- Şen, Z. (2009). Kuraklık, afet ve modern hesaplama yöntemleri (1. Baskı). *İstanbul: Su Vakfı Yayınları*.
- Tatlı, H., Dalfes, N. H. and Menteş, S. Ş. (2006). Yeni istatistiksel ölçek küçültme yöntemleri ve Türkiye için uygulamalar. *DTÜ Mühendislik Dergisi*, 5, 269-280.

- Tekleab, S., Uhlenbrook, S., Mohamed, Y., Savenije, H. H. G., Temesgen, M. and Wenninger, J. (2011). Water balance modeling of Upper Blue Nile catchments using a top-down approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2179-2193.
- Thomas, H. A. (1981). Improved methods for national water assessment: Final report. *US Geol. Surv. Water Resour*, Contract WR, 44.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Trambauer, P., Maskey, S., Werner, M., Pappenberger, F., Beek, L. P. and Uhlenbrook, S. (2014). Identification and simulation of space-time variability of past hydrological drought events in the Limpopo river basin, Southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(3), 2639-2677. doi:10.5194/hessd-11-2639.
- Tripathi, S., Srinivas, V. V. and Nanjundiah, R. S. (2006). Downscaling of precipitation for climate change scenarios: a support vector machine approach. *Journal of Hydrology*, 330 (3-4), 621-640.
- Trzaska, S. and Schnarr, E. (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. *United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD: Pasadena, CA, USA*.
- von Storch, H., Zorita E. and Cubasch, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*, 6 , 1161-1171.
- Waseem, M., Ajmal, M. and Kim, T. W. (2015). Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment. *Journal of Hydrology*, 527, 30–37.
- Wilby R. L., Dawson C. W. and Barrow E. M. (2002). SDSM – a decision support tool for the assessment of climate change impacts. *Environmental Modeling & Software*, 17, 147–159.
- Wilby, R. L. (1994). Stochastic weather type simulations for regional climate change impact assessment. *Water Resources Research*, 30, 3395-3403.
- Wilby, R. L., Tomlinson, O. J. and Dawson C. W. (2003). Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*, 23, 183-194.
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In D. A. Wilhite (Ed.), *Drought: A Global Assessment (pp. 3–18)*. London: Routledge.
- Wilks, D. S. and Wilby, R. L. (1999). The weather generation name: A review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23, 329-357.

- Xu, C. Y. and Vandewiele, G. L. (1995). Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. *Advances in Water Resources*, 18(1), 39-48.
- Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y. and Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 526, 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.047>.
- Yang, C., Wang, N. and Wang, S. (2017). A comparison of three predictor selection methods for statistical downscaling. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1238-1249.
- Yang, J., Gong, D., Wang, W., Hu, M. and Mao, R. (2012). Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 115(3–4), 173–184.
- Yıldız, F. ve Gurer, İ. (2014). Sultansazlığı sulak alanı için buharlaşma yöntemlerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(3), 247-254.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. and Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333–349.
- Zhang, J., Sun, F., Xu, J., Chen, Y., Sang, Y. and Liu, C. (2015). Dependence of trends in and sensitivity of drought over china (1961–2013) on potential evaporation model. *Geophysical Research Letters*, 43, 206–213. <https://doi.org/10.1002/2015GL067473>.
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. and Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360(1–4), 117–131.
- Zhao, T. and Dai, A. (2016). Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part II: Model-simulated historical and future drought changes. *Climatic Change*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1742-x>.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hatice ALTUN

Doğum tarihi ve yeri : .

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2022
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2019
Lise	Açık Öğretim Lisesi	2015