

İÇİNDEKİLER

- 1.) Sığ Akım Denklemlerinin Hidrolikte Kullanılması Üzerine Değerlendirmeler
- 2.) Küresel İklim Değişimi ve Türkiye Mikdat Kadıoğlu
- 3.) Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının Belirlenmesi: Doğu Karadeniz Bölgesi
- 4.) Doğu Karadeniz Havzası'nın L-Momentlere Dayalı Taşkın Frekans Analizi
- 5.) Frequency Based Prediction of Büyük Menderes Flows†
- 6.) Mevsimsel Yağışların Jeostatistiksel Yöntemle Modellenmesi ve Gözlemi Olmayan Noktalarda Tahmin Edilmesi
- 7.) Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Enterkonnekte Sistemde PSS/E ile Modellenmesi Wind Power Plants in Interconnected System Modelling with PSS/E

Sığ Akım Denklemlerinin Hidrolikte Kullanılması Üzerine Değerlendirmeler

Behiye Nilay İŞCEN¹
Nuray ÖKTEM²
Burak YILMAZ³
İsmail AYDIN⁴

ÖZ

Sığ akım denklemlerinin geniş alanlara yayılan taşkınları hesaplamada başarılı olduğu bilinmekte ve bu denklemler taşkın analizleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kentsel alanlardaki yapılar arasında ilerleyen taşkınlar ve köprü gibi hidrolik yapılar etrafındaki akımlar sığ akım sınırlamalarını tam olarak sağlamamakta ve daha çok 3-Boyutlu (3B) akım özelliği taşımaktadır. Ancak, hızlı sayısal çözüm kolaylığı bakımından sığ-akım denklemleri bu tür 3B akımlar için de kullanılabilen ve yararlı çıktılar elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, sığ akım denklemleri, 3B özellikleri öne çıkan akımlara uygulanarak sonuçları değerlendirilmiştir. Su derinliği ve yatay düzlemde hız dağılımının yeterli ayrıntıda hesaplanabildiği, sel rejiminde su yüzünde oluşan şok dalgalarının ayrıntılı olarak tanımlanabildiği gözlenmiştir. Ancak, birden fazla 3B engel etrafından geçen akımlarda su derinliği hesaplamadaki hataların eklenerek arttığı belirlenmiştir. Sınır tabaka özelliklerinin öne çıktığı üniform akım durumunda uygun bir türbülans modeli kullanılması halinde, hız ve yatak kesme gerilmeleri dağılımlarının da başarıyla hesaplanabildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sel, taşkın, sığ akım denklemleri, şok yakalayıcı çözümler, Riemann çözücüler.

ABSTRACT

On the Use of Shallow Water Equations in Hydraulics

Shallow water equations are widely used in inundation analysis and they are known to be successful in computation of floods over wide terrains. Flood propagation in between buildings in urban areas and flows around hydraulic structures such as bridges may not satisfy the assumptions of shallow flow and may display markedly more 3-Dimensional

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 31.07.2015 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- 1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bnilayiscen@gmail.com
- 2 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Matematik Bölümü, Çanakkale - nbozkaya@gmail.com
- 3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara
- 4 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ismaydin@metu.edu.tr

(3D) flow characteristics. However, for the convenience of fast numerical solutions, the shallow-current equations can also be used for such 3D flows and useful output may be obtained.

In this study, shallow water equations are applied to flows with prominent 3D characteristics and results are evaluated. Water depths and velocity field in horizontal plane were calculated satisfactorily, surface waves in supercritical flow involving shocks were described in detail. However, it has been determined that the flow around several 3D obstacles increases by adding faults that calculate water depth. In case of uniform flows with boundary layer characteristics, velocity and bed shear stresses were predicted successfully using a suitable turbulence model.

Keywords: Flood, inundation, shallow water equations, shock capturing solutions, Riemann solvers.

1. GİRİŞ

Serbest yüzeyli akımlar içeren hidrolik mühendisliği uygulamalarında akım koşullarının detaylı bir analizini yapabilmek için su derinliğinin hesaplanması bir ilk adımdır. Bu amaçla 1B integral denklemlerin sayısal çözümü yaygın bir uygulama olup 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren nehir mühendisliği hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bilgisayarların gelişmesi ile daha da kolaylaşan tek boyutlu çözümler özellikle baraj yıkılması gibi taşkın dalgalarının ilerlemesini hesaplamada kullanılmıştır.

Doğal ortamlardaki akımlar daima 3B olduğu halde, mühendislik uygulamalarında pratik ve hızlı bir çözüm elde edebilmek amacıyla, 2B veya 1B basitleştirilmiş matematik modellerden yararlanılabilir. Günümüzde, sadece sınırlı büyüklükteki alanlarda, dolu savak, enerji kırıcı havuz ve köprü gibi önemli hidrolik yapıların etrafında kapsamlı 3B sayısal çözümler yapılabilmektedir. Onlarca kilometre uzayıp giden nehir yatakları ya da taşkın alanları için 3B çözümler ekonomik olmadığı gibi, gerekli de değildir. Taşkın analizi yapılacak alanlarda akımın zamana karşı ilerleyişini doğru hesaplayabilmek için, zamanda hassas çözümler yapılması gereklidir. Ancak, akım parametrelerinin düşey yöndeki değişimi taşkın analizi için önemli olmadığından denklemlerin düşey yönde (derinlik üzerinde) integrali alınarak, derinlik ortalamalı değerler için çözülmesi yeterli olmaktadır. Bu durumda süreklilik denklemleri derinlik için, yatay yönlerdeki iki momentum denklemleri de yatay hız bileşenleri için çözülmektedir. Derinlik integralli akım denklemleri 'Sığ Akım Denklemleri' (SAD) olarak adlandırılmakta olup taşkın akımları dışında göllerde, kıyı alanlarında dalga ilerlemesinde, okyanuslarda akıntı ve çevrinti hesabında ve atmosfer katmanlarındaki tabaka akımlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Denklemlerin geçerliliği için temel koşul, akım alanında yatay boyutun düşey boyuttan yeterince büyük olmasıdır.

Herhangi bir serbest yüzeyli akım için SAD kullanıldığında sayısal çözüm bakımından önemli avantajlar kazanılmaktadır. Süreklilik denklemleri doğrudan su derinliği için çözüldüğünden, 3B sayısal çözümdeki su yüzeyinin konumunun belirlenmesi problemi ortadan kalkmaktadır. Ayrıca, derinlik integrali sırasında düşey yöndeki ivme ihmal edildiğinden, aynı yönde hidrostatik basınç dağılımı kabulü de yapılmış olmaktadır. Böylece, SAD çözümünde basınç için bir denklem çözümüne ihtiyaç kalmamaktadır. Bu durum matematik ve sayısal yönden önemli sadeleşme sağlamakta ise de denklemlerin

farklı problemlerde kullanımına fiziki anlamda önemli kısıtlamalar getirmektedir. Bu çalışmada bu konunun tartışılması amaçlanmıştır.

2. SIĞ AKIM DENKLEMLERİ (SAD)

Navier-Stokes denklemlerinin derinlik yönünde integrali alınarak [1] elde edilen SAD takımı, süreklilik denklemi ve yatay yöndeki iki momentum denkleminin oluşur. Denklem takımının ve sayısal çözümün toplu bir sunumunu yapabilmek için vektör notasyonu kullanılacaktır.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}^c = \mathbf{S} + \nabla \cdot \mathbf{F}^d \quad (1)$$

Burada, t zamanı, \mathbf{U} bağımlı değişkenleri, $\mathbf{F}^c = (E^c, G^c)$ konvektif akıyı, $\mathbf{F}^d = (E^d, G^d)$ difüzyif akıyı, ∇ del operatörü ve \mathbf{S} ilgili denklemin kaynak terimlerini gösteren vektördür. Vektörlerin bileşenlerinin açık tanımları Denklem (2)'de matrisler halinde verilmiştir.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \quad E^c = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}, \quad G^c = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}, \quad E^d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h}{\rho}\tau_{xx} \\ \frac{h}{\rho}\tau_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2)$$
$$G^d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h}{\rho}\tau_{yx} \\ \frac{h}{\rho}\tau_{yy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \\ gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \end{bmatrix}$$

Burada h su derinliği, u ve v derinlik ortalamalı hızlar, hu x -yönündeki birim debi, hv y -yönündeki birim debi, g yerçekimi ivmesi, ρ suyun yoğunluğu, τ viskoz ve türbülans gerilmelerin toplamı, S_0 taban eğimi, S_f sürtünme eğimidir. Denklem (2)'de sayısal çözüm tekniği bakımından uygun olduğu için basınç terimleri de konvektif terimler içinde verilmiştir. Sürtünme eğiminin hesabında klasik Manning pürüzlülük parametresi n 'den yararlanılır.

$$S_{f,x} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{f,y} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

Birçok SAD çözümünde viskoz terimler ve türbülans hiç dikkate alınmamaktadır. Özellikle, baraj yıkılması ve taşkın ilerlemesi problemleri için bu kabul yaygındır. Ancak, yatay düzlemde sirkülasyon ve vorteks oluşumunun önemli olduğu durumlarda viskoz etkiler ve türbülans gerilmeler çözüme dahil edilmektedir. Ayrıca, katı yapıların yakın

çevresindeki akımların hesabında, doğru (kaymaz) sınır koşullarını uygulayabilmek ve gerçekçi hız dağılımları elde edebilmek için viskoz terimler matematiksel olarak da gereklidir. Derinlik integralli bir matematik model için ayrıntılı bir türbülans modeline gerek duyulmadan, klasik türbülans viskozitesi yaklaşımından yararlanarak toplam gerilmeler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_{i,j} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Burada, ν kinematik moleküler viskozite ve ν_t kinematik türbülans viskozitesidir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinde başarı, önemli ölçüde problemin sınır koşullarının doğru uygulanmasına bağlıdır. Sınır koşulları sayısal yakınsamayı etkilediği gibi, çözümün fiziksel geçerliliğini de belirler. SAD çözümlerinde karşılaşılabilecek sınır tipleri; akım girişi, akım çıkışı, duvar, simetri ve periyodik olabilir. Her sınır tipinde tanımlanması gereken sınır koşulları ve değişken sayısı kullanılan matematik modelin yanı sıra akımın kritik-altı veya kritik-üstü olmasıyla da değişmektedir.

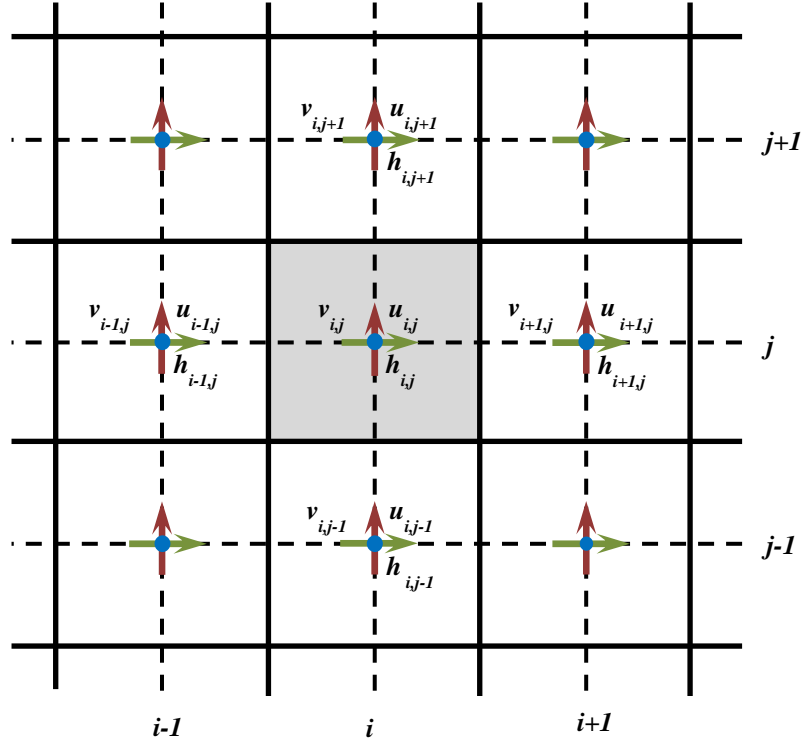
3. SAYISAL ÇÖZÜM

SAD lineer olmayan, hiperbolik karakterli kısmi diferansiyel denklemlerdir. En önemli özelliği, su yüzünde oluşabilecek şok dalgalarından dolayı çözümünde süreksizliklerin bulunmasıdır. Çözümdeki süreksizliğin en anlaşılır örneği ‘ani baraj yıkılması’ olarak adlandırılan idealize edilmiş bir düşey duvar arkasındaki hidrostatik suyun, duvarın ani kaldırılması ile dayanaksız kalması halidir. O noktada hesaplanan su yüzü eğimi sonsuzdur. Başlangıçta düşey duvara paralel olan su, hızla deforme olarak tamamen yatay bir konuma gelinceye kadar akım hali devam edecektir. Membada hidrostatik duruma başlayan akım probleminin, mansapta farklı bir yatak içinde tekrar hidrostatik duruma gelinceye kadar geçen sürecin hesaplanması söz konusudur. Dolayısıyla, sayısal çözüm yönteminin bağımlı değişkenlerdeki süreksizliği düzlemeden olduğu gibi yakalayabilmesi ve değişkenlerin zamanda değişimini doğru olarak hesaplayabilecek yetenekte olması gerekir. Standart sonlu farklar yönteminde türevler noktasal olarak sonlu farklar ile ifade edilir. Bu tür yaklaşımlar özellikle süreksizlikler civarında beklendiği gibi çalışmamaktadır. Sonlu hacim yöntemleri süreksizlikleri çözebilmek bakımından daha uygundur. Sonlu hacim yöntemlerinde akımın gerçekleştiği uzay, ağ hücresi olarak adlandırılan göreceli küçük sonlu hacimlere bölünmektedir. Bu metod sayısal çözümde her hücredeki ortalama değer hesaplanmasını sağlamaktadır. Her zaman adımında, önce hücre yüzeylerindeki akılar bulunarak ilgili değişkenin hücre içindeki ortalama değeri hesaplanır. Sayısal çözümün başarısı yüzeylerdeki akıların, değişkenlerin süreksizliği durumunda da doğru olarak bulunmasına bağlı olup, bazen çok problemlili olabilmektedir.

Hiperbolik kısmi diferansiyel denklemler yayılma problemlerini tanımlar. Doğadaki birçok akım basitçe dalga karakteri olarak tanımlanabilecek hiperbolik özellik taşımaktadır. Bu tür bir akımda, bir noktadaki değişkenin önceki değeri başka bir noktadaki anlık değeri etkileyerek akım koşullarını değiştirebilir. Diğer bir ifade ile bir noktadaki çözüm bilgisi akımla birlikte ilerlemektedir. Hücre yüzeylerindeki akıların hesaplanmasında farklı hesap

şemaları kullanılabilmekte ve bu da sayısal çözümü önemli ölçüde etkilemektedir. Yaygın olarak kullanılan ‘rüzgar yönlü şemalar’ yüzeylerdeki akıları bulurken akım yönünü dikkate aldığından daha doğru sayısal akı hesaplamasına olanak verirler.

Hücre yüzeylerindeki akılar hesaplanırken her değişken için süreksizlik olabileceği düşünülerek tek yönlü bir Riemann problemi çözülmektedir. Riemann problemi tanımı, bir hesap hücresinin herhangi bir yüzeyinde bağımlı bir değişkenin, yüzeye sağdan veya soldan yaklaşılması durumlarında değerinin birbirinden farklı olabileceği kabulüne dayanmaktadır [2]. Bu durumda hücre yüzeyindeki akı, olası tüm dalga oluşumları; şok (shock), seyreltme (rarefaction), temas süreksizliği (contact discontinuity) ve bütün değişkenlerin etkileşimleri de dikkate alınarak bulunmalıdır. Bu işlem karmaşık bir koşullar ve karşılaştırmalar dizisi içermekte olup literatürde ‘Riemann çözücüler’ olarak bilinmektedir. Riemann problemi tam olarak çözülebilmekle beraber, daha az hesap süresi gerektiren ‘yaklaşık Riemann çözücüler’ de yaygın olarak kullanılmaktadır. Riemann problemi tanım olarak tek boyutlu olsa da, çok boyutlu problemlerin çözümünde de (her yönde ardışık uygulama ile) yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1. Hesap ağı ve bağımlı değişkenlerin tanımlanması [3]

Rüzgar yönlü şema ve Riemann çözücülerden yararlanarak önceki sayısal yöntemlerin eksikliklerini gideren Godunov metodu HAD uygulamalarına yeni bir boyut getirmiştir. Temel olarak birinci derece rüzgar yönlü şema ile lineer olmayan korunum kanunlarının çözümünde süreksizlikler civarında en doğru çözümü elde etmeyi amaçlamaktadır. Tam ya da yaklaşık Riemann çözücüler Godunov metodunun esas elemanlarıdır. Metot her zaman adımında ve her hücreler arası yüzeyde Riemann probleminin çözümüne dayanmaktadır. Sıralı (structured) dikdörtgen bir hesap ağında (Şekil 1) Denklem (1)'in sonlu hacim yöntemi ile ayrıklaştırılmış hali aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = & \mathbf{U}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^c{}^n - E_{i-\frac{1}{2},j}^c{}^n \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^c{}^n - G_{i,j-\frac{1}{2}}^c{}^n \right) \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^d{}^n - E_{i-\frac{1}{2},j}^d{}^n \right) + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^d{}^n - G_{i,j-\frac{1}{2}}^d{}^n \right) + \Delta t \mathbf{S}_{i,j}{}^n \end{aligned} \quad (5)$$

Burada $\mathbf{U}_{i,j}^n$ hesap hücre merkezindeki bağımlı değişken, i, j x - ve y -yönündeki hücre indisi, n zamandaki adım üst indisi, Δt zamanda adım, Δx ve Δy hücre boyutları, \mathbf{F}^c ve \mathbf{F}^d hücre yüzeylerinde toplam (konvektif + difüzyon) akı ve \mathbf{S} hücre merkezindeki kaynak terimidir. Konvektif akılar Riemann problemi çözümünden elde edildiğinde, Denklem (5) ile verilen sonlu hacim formülü uzayda ikinci dereceden doğru ve şok yakalayıcı (shock capturing) özelliğine sahiptir. Çözümün zamanda da ikinci dereceden doğru olması için iki adımlı, öngören-düzelten yaklaşımından yararlanır [4]. Önce, zamanda yarım adımla öngörülen değerler bulunur.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i,j}^P = & \mathbf{U}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^c{}^n - E_{i-\frac{1}{2},j}^c{}^n \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^c{}^n - G_{i,j-\frac{1}{2}}^c{}^n \right) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^d{}^n - E_{i-\frac{1}{2},j}^d{}^n \right) + \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^d{}^n - G_{i,j-\frac{1}{2}}^d{}^n \right) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S}_{i,j}{}^n \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'da üst indis 'P' yarım zaman adımındaki öngörülen değerleri gösterir. İkinci aşamada tam zaman adımı ile $n + 1$ seviyesinde düzeltilmiş değerler hesaplanır.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = & \mathbf{U}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^c{}^P - E_{i-\frac{1}{2},j}^c{}^P \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^c{}^P - G_{i,j-\frac{1}{2}}^c{}^P \right) \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(E_{i+\frac{1}{2},j}^d{}^n - E_{i-\frac{1}{2},j}^d{}^n \right) + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^d{}^n - G_{i,j-\frac{1}{2}}^d{}^n \right) + \Delta t \mathbf{S}_{i,j}{}^P \end{aligned} \quad (7)$$

Hesap hücre yüzeylerindeki konvektif akıların hesabında Riemann problemini yaklaşık çözen Roe metodu kullanılmıştır. Bu metodun tanımı ve başarımı hakkında çok sayıda çalışma yapılmış ve yayımlanmıştır ([4], [5]), bu nedenle burada tekrarlanmayacaktır. Sayısal çözümün diğer önemli özelliği ise hesaplanan akıların sınırlamada kullanılan eğim- ya da akı-sınırlayıcılarıdır. Herhangi bir noktada, bir değişkenin eğimi süreksizlik nedeniyle

sonsuz büyüklükte olabilir. Böyle bir durumda hesaplamaların sürdürülebilmesi için hesaplanan eğimde (veya akıda) sınırlamalara gidilir. Eğim sınırlama işlemini yapan çok sayıda ampirik fonksiyon ilgili literatürde mevcuttur. Bu çalışma boyunca Superbee, Van Leer, Van Albada ve Minmod sınırlayıcıları kullanılmıştır [6].

Denklemler (6) ve (7) ile tanımlanan ardışık hesaplamaların istikrarlı bir şekilde gerçek çözüme ulaşabilmesi için, zaman adımında sınırlama gereklidir. Bu çalışmada kullanılan zaman adımı bir CFL sayısı belirleyerek aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\Delta t = CFL \min \left\{ \frac{\Delta x, \Delta y}{(c + \sqrt{u^2 + v^2})_{i,j}} \right\} \quad (8)$$

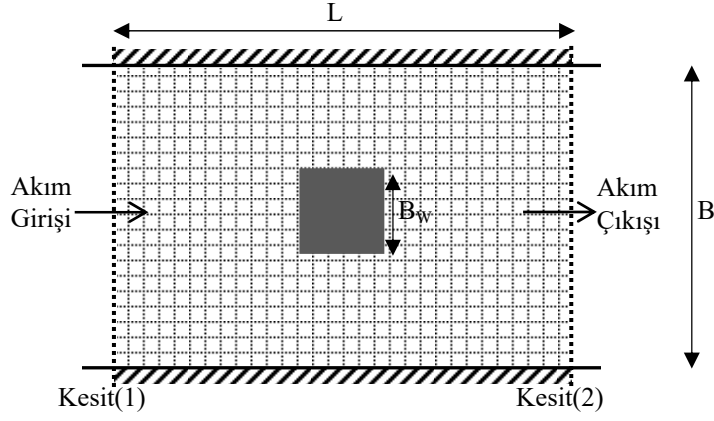
Burada c dalga hızı ($=\sqrt{gh}$) olup, tüm çözümlerde CFL sayısı 0.5 olarak sabitlenmiştir. Yukarıda tanımlanan sayısal model, FORTRAN bilgisayar dilinde kodlanarak çalıştırılmış ve öncelikle 1B baraj yıkılması test problemleri için koşturulmuştur. Sonuçlar literatürde mevcut analitik çözümlerle karşılaştırılmış, tanımlanan algoritmanın başarımı test edilmiş ve daha önce diğer araştırmacılar tarafından rapor edilen sonuçların aynı doğrulukta tekrarlandığı görülmüştür. Burada kullanılan çözüm yönteminin başarımı ile ilgili olarak, 1B testler ilgili literatürde ([7], [8], [9]) farklı araştırmacılar tarafından yayımlandığı için burada tekrarlanmayacaktır. Daha sonra bu çalışmanın ana fikri kapsamında 3 ayrı akım durumu dikkate alınmış ve sayısal çözümler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4. UYGULAMALAR

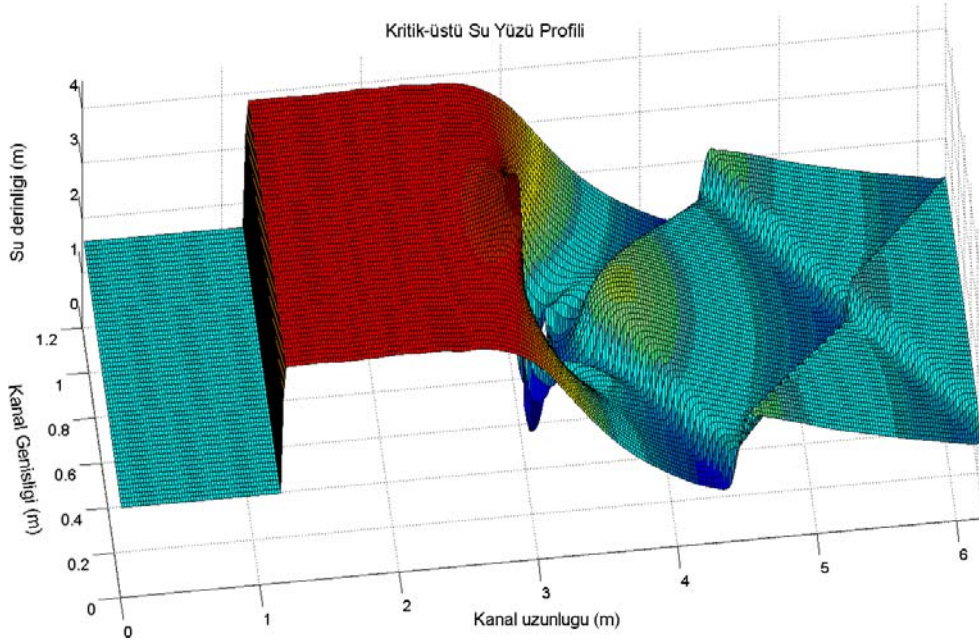
4.1 Prizmatik Kanalda Kübik Engel Etrafında Akım

Açık kanal akımlarında geometrik geçişlerde yaşanan akım olaylarının doğru canlandırılması, sayısal çözüm yönteminin başarısını göstermek bakımından önemlidir. Kritik-üstü akımlarda yüzeyde oluşan şok dalgalarının etkileşimi, kanal içindeki bir engel nedeniyle daralan kesitten geçen akımın uğradığı değişim ve hidrolik sıçrama gibi akım olaylarının gerçeğe uygun olarak hesaplanabilmesi, sağlanması gereken koşullardır. Bu tür geçiş akım ayrıntılarını inceleyebilmek için SAD önce literatürdeki birçok uygulama gibi viskoz ve türbülans terimleri olmadan çözülmüştür. Prizmatik bir kanal içinde bir adet kübik engel (Şekil 2) yerleştirilmiş ve akımın bu engel etrafından geçişi incelenmiştir. Sayısal çözüm alanı için kullanılan denklemlere uygun sınır şartlarını tanımlamak amacıyla, duvar sınırlarında viskoz olmayan kayma sınır koşulları uygulanmıştır. Akım yönünde blok etrafında simetrik akım beklendiği için orta eksende simetri koşulu tanımlanarak hesap alanının yarısı için çözüm yapılmıştır. Kanal ve blok duvarlarında, katı yüzeye dik hız bileşenleri sıfır olarak tanımlanırken, yüzeye paralel hızların sıfırdan farklı olmasına izin verilmiştir. Simetri ekseninde ise kütle geçişine izin vermemek için eksene dik hız sıfır olarak tanımlanmıştır. Akım girişi ve akım çıkışında sınır koşullarının tanımlanması akımın rejimi ile ilgilidir [10]. Kritik-altı akımda çıkışta derinlik sabitlenirken girişte her iki yöndeki birim debi sabitlenmiştir. Kritik-üstü akımda ise girişte derinlik ve her iki yöndeki

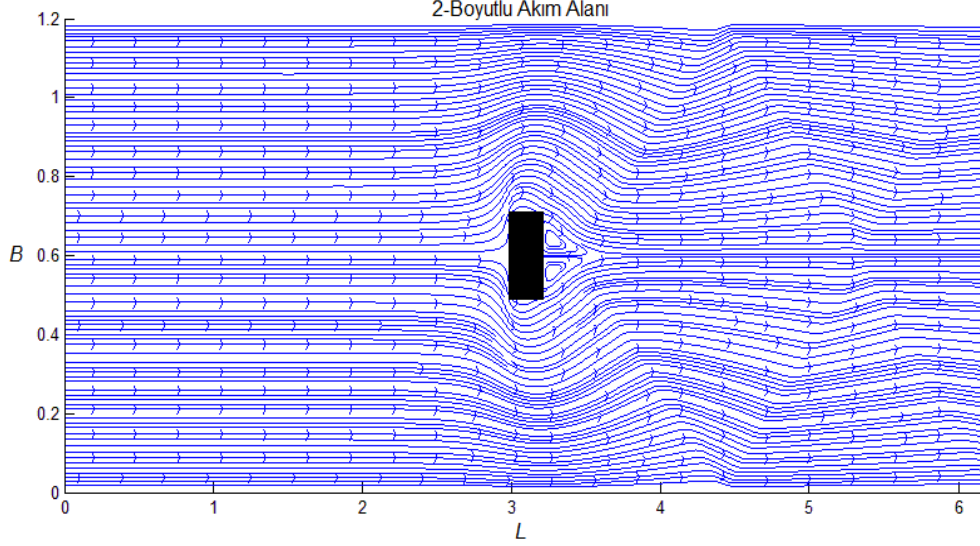
birim debiler sabitlenirken, çıkışta tüm bağımlı değişkenlerin birinci türevleri sıfırlanmıştır. Hızlar ise her zaman birim debi ve derinlikten hesaplanan değerlerdir.



Şekil 2. Kübik engel etrafında akım için hesaplama alanı tanımlanması [3]



Şekil 3. Kübik blok etrafında kritik-üstü akımda su yüzü profili [3]



Şekil 4. Kübik blok etrafında kritik-üstü akımda yatay düzlemde akım çizgileri [3]

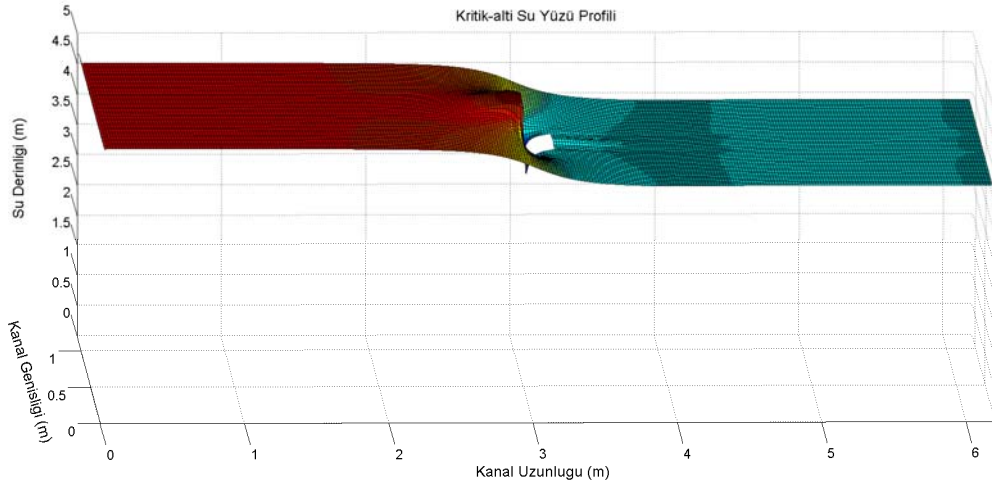
Sayısal çözüm ağı kare elemanlardan oluşur ve ağ büyüklüğü sabittir. Çözümün ağ büyüklüğünden bağımsız olduğunu görmek amacıyla üç ayrı büyüklükte hesap hücresinden oluşan ağlar kullanılmış, aynı sonuçların bulunduğu görülmüş ve orta büyüklüğün sonuçları sunulmuştur. Bu bölümde sunulan sonuçlar 60x310 hesap hücresinden oluşmaktadır. Kritik-üstü akım için su yüzü profili Şekil 3'te sunulmuştur. Kübik blok girişten $x = 3$ m de yerleştirilmiş olup blok etrafında su yüzündeki sert dalgalanmaları göstermek amacıyla bu şekil içindeki yeri boş bırakılmıştır. Öncelikle, seçilen akım koşullarında blok etrafında akım, enerji yetmezliği nedeniyle boğulmakta (choking) ve enerjiyi yükseltebilmek için de kritik-altı rejime geçmektedir. Rejim değişikliği sonucu blok yukarısında hidrolik sıçrama oluşmaktadır.

Sayısal çözümün başlangıcında tüm hesap alanında kritik-üstü akımın normal derinliği başlangıç değeri olarak verilmiştir. Boğulma ile birlikte, bloğun hemen ön yüzünde hidrolik sıçrama başlamakta ve dengesini bulana kadar yukarı yönde hareket etmektedir. Çalışılan akım zamandan bağımsız olmakla birlikte, çözüm yöntemi bir geçiş (transient) akımı oluşumuna izin vermektedir. Şekil 3'te sunulan su yüzü profili denge durumu öncesi bloğa yakın bir noktada hidrolik sıçrama göstermekte olup, yeterince uzun bir hesap alanı kullanıldığında hidrolik sıçrama bloktan memba yönünde uzak bir noktaya kayarak sonunda stabilize olmaktadır. Kullanılan sayısal yöntem hidrolik sıçramayı neredeyse düşey, köşeli bir şok dalgası olarak göstermekte ve akım alanı içindeki hareketini herhangi bir sayısal sorun yaratmadan hesaplayabilmektedir. Ayrıca, bloktan sonra oluşan ve duvarlardan yansımalarla birbiri üstüne bindiren baklava dilimi görünümündeki durağan şok dalgaları da, özellikleri gereği tüm çözüm işlemi boyunca yerlerini korumaktadır. Bu sonuçlar sayısal yöntemin hareketli, hareketsiz her türlü şok dalgasını, hidrolik sıçrama ve boğulma gibi akım geçişlerini hesaplayabildiğini göstermektedir. Özellikle hidrolik

şıçramanın son derece dik olarak hesaplanabilmesi, sayısal yöntemin değişkenlerdeki süreksizliği dağıtmadan, olduğu gibi ortaya çıkarabildiğinin kanıtı olarak görülmektedir.

Aynı akım durumu için akım çizgileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Çizgilerin netleştirilmesi için şekil orantısız verilmiştir. Kanal ortasındaki kübik engel kare olarak düşünülmelidir. Blok mansabındaki döngüler ve durağan şok dalgalarının duvarlardan yansiyarak baklava dilimi görünümündeki etkileşimi de açık olarak görülmektedir.

Benzer bir sayısal çözüm kritik-altı akım için gerçekleştirilmiş ve elde edilen su yüzü profili Şekil 5'te sunulmuştur. Akım kritik-altı olduğu için blok yukarısında su derinliği artarak bloğun daralttığı kesitten geçmek için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Bu kez herhangi bir şok dalgası oluşmamakta ve akım membada biriktirdiği enerji ile blok etrafından hızlanarak geçebilmektedir.

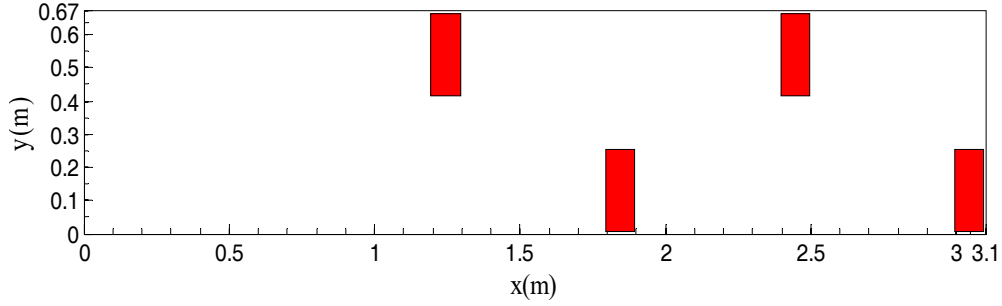


Şekil 5. Kübik blok etrafında kritik-altı akımda su yüzü profili [3]

4.2 Prizmatik Kanalda Yerleştirilen Şaşırtmalı Mahmuzlar Arasında Akım

Bu çalışmada kullanılan ikinci akım konfigürasyonu, birden fazla engel arasından geçen bir kanal akımıdır. Bu bölüm, fiziki bir modelden elde edilen ölçümlerle de desteklenmiştir. Prizmatik, yatay bir kanal içine şaşırtmalı olarak yan duvarlara yerleştirilen mahmuzlar arasında (Şekil 6) oluşan 3B akım deneysel olarak incelenmiştir [11]. Buradaki amaç, mahmuzlar arasından hızlanarak geçen akımın oluşturduğu mahmuzlar etrafındaki vorteksler ve hızlanan akımla birlikte düşen su derinliğinin neden olduğu 3B akımın SAD ile ne ölçüde hesaplanabileceğine ışık tutmaktır. Çok sayıda vorteks yapısının neden olduğu karışım ve yüksek türbülans, akımın 3B olma özelliğini öne çıkarmaktadır. Böyle bir durumda SAD çözümünün özellikle hız dağılımları bakımından geçersiz olacağı açık olmakla birlikte, su yüzü profili hesabının geçerli olup olmayacağı tartışılabilir bir durumdur. Nitekim, bazı 3B çözümlerde su yüzü profilinin SAD çözümünden elde edildiği de bilinmektedir. Laboratuvar ortamındaki fiziki modelde farklı debiler ve mansap koşulları

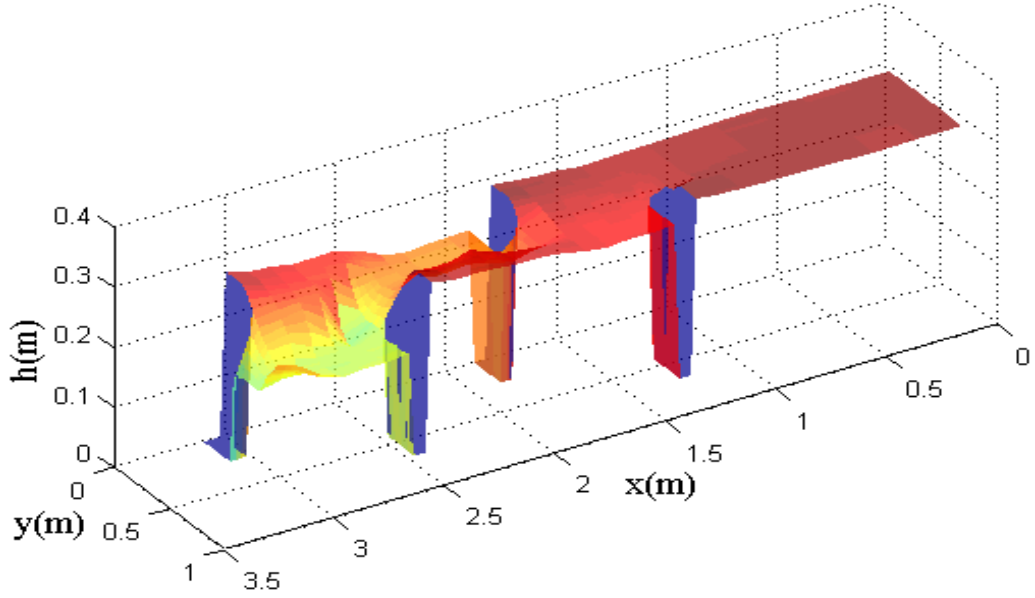
için su yüzü profilleri ölçülmüş ve SAD çözümleriyle karşılaştırılmıştır. Vorteks yapıları nedeniyle akım oldukça çalkantılı olduğundan, su yüzü ölçümünde minimum ve maksimum seviyeler okunmuş ve ortalama değerler bulunmuştur. Kanal sonunda kontrollü ve kontrolsüz çıkış durumları denenmiştir. Burada deneylerden sadece bir tanesi, kontrolsüz çıkış durumunda alınan ölçümler, sayısal çözüm ile karşılaştırılmıştır. Diğer deneylerde de durum farklı değildir.



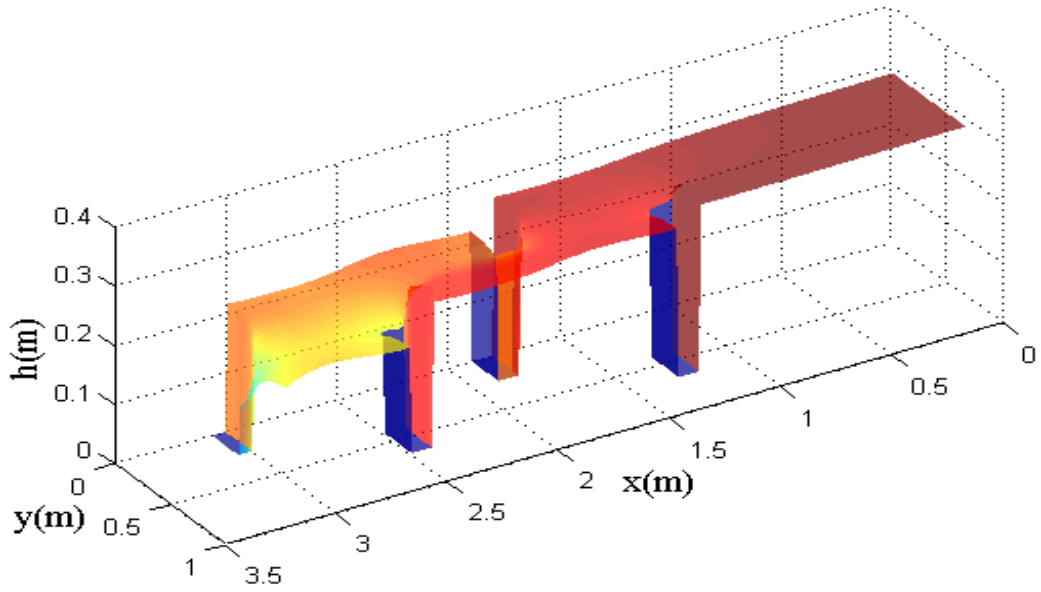
Şekil 6. Prizmatik, yatay kanal içinde yerleştirilen şaşırtmalı mahmuzlar [11]

Sayısal çözümde duvarlarda kaymaz sınır koşulunu sağlamak için Denklem (2) içindeki viskoz terimler dahil edilmiş ve Denklem (4)'te tanımlandığı şekliyle türbülans gerilmeleri de hesaba katılmıştır. Türbülans viskozitesinin derinlik integral değeri tüm akım alanı için sabit tutulmuş ve sayısal deneyler sonucunda $0.007 \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Bu aşamada hız dağılımları ile ilgili bir karşılaştırma yapılmayacağından türbülans viskozitesinin tüm akım alanında sabit tutulmasında bir sakınca görülmemiştir. Girişte ölçülen su derinliği ve birim debiler sınır şartı olarak uygulanmış, çıkışta ise akım yönünde sıfır türev uygulaması yapılmıştır. Çıkış sınır koşulunun akımı memba yönünde etkilememesi için hesap alanı uzatılarak, çıkış sınır koşulu yeterince uzak bir kesitte uygulanmıştır.

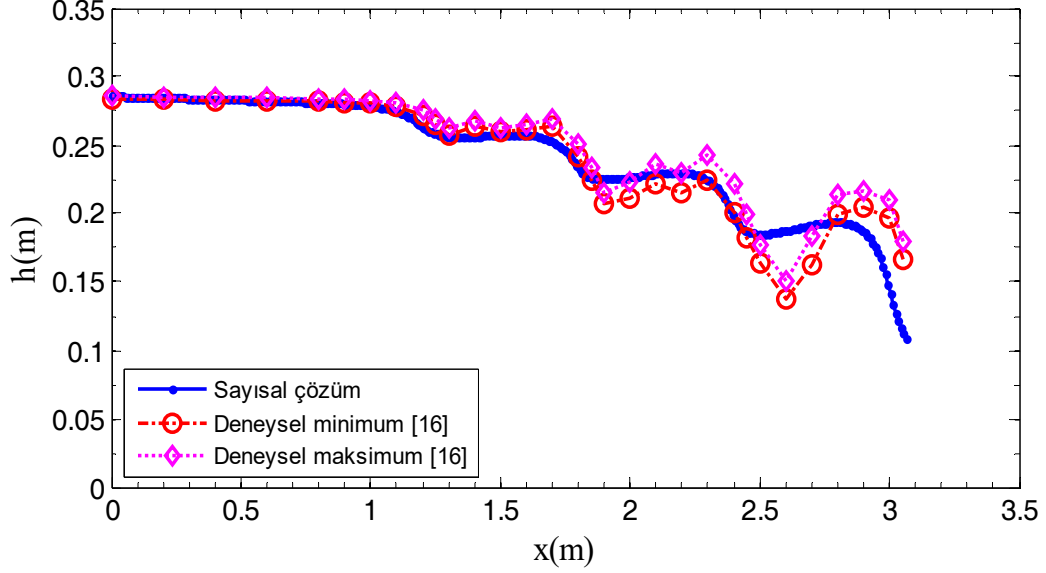
Deney kanalında $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ debi için yapılan su yüzü ölçümleri Şekil 7'de sunulmuştur. Giriş bölgesinde mahmuzlar arkasında yükselen su seviyesi ile akım kritik-altı rejimde olup, bloklar arasından geçtikçe hızlanmakta, su derinliği azalmakta ve Froude sayısı artarak kritik-üstü rejime geçmektedir. Doğal olarak bu bölgede SAD derivasyonunda ihmal edilen düşey hız bileşeni önemli olmakta, basınç dağılımı da hidrostatik dağılımdan farklılaşmaktadır. SAD sayısal çözümünden elde edilen su yüzü profili Şekil 8'de sunulmuştur. Genel olarak iyi bir uyum sağlanmakla birlikte, akım yönünde artan mahmuz sayısı geçildikçe hesaplanan su yüzü profili giderek ölçülenden farklılaşmaktadır. Bu gözlemi daha açık görebilmek amacıyla, kanal aksı boyunca orta eksende ölçülen en düşük ve en yüksek su seviyeleri ve hesaplanan su derinlikleri Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. Özellikle 3'üncü mahmuzdan sonra hesaplanan su derinliklerinin ölçülen iniş-çıkışı yakalayamadığı görülmektedir.



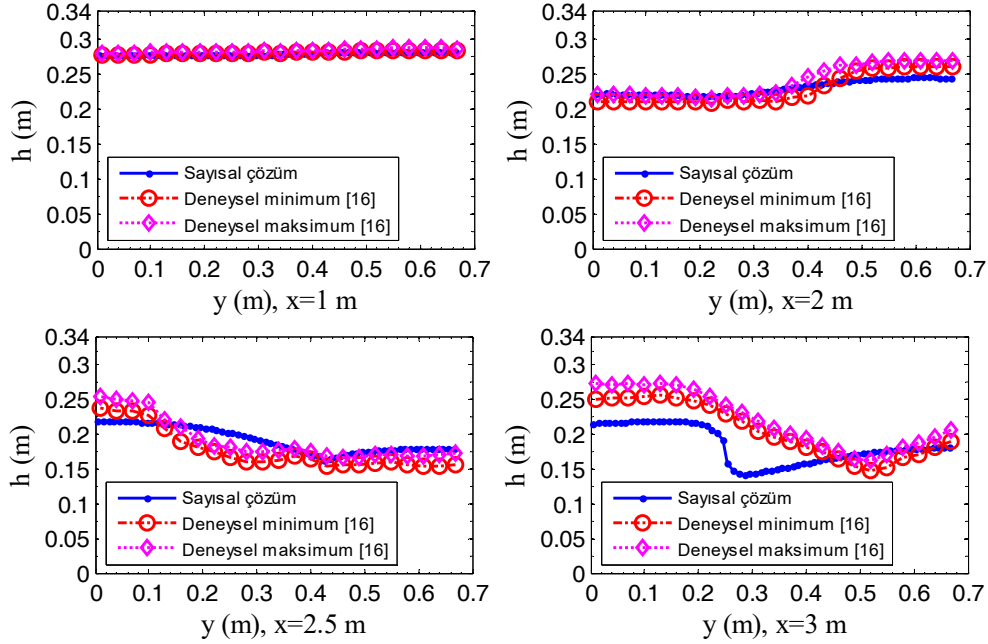
Şekil 7. Yatay kanalda yerleştirilen şaşırtmalı mahmuzlar arasında ölçülen su yüzü profili [11]



Şekil 8. Yatay kanalda yerleştirilen şaşırtmalı mahmuzlar arasında hesaplanan su yüzü profili



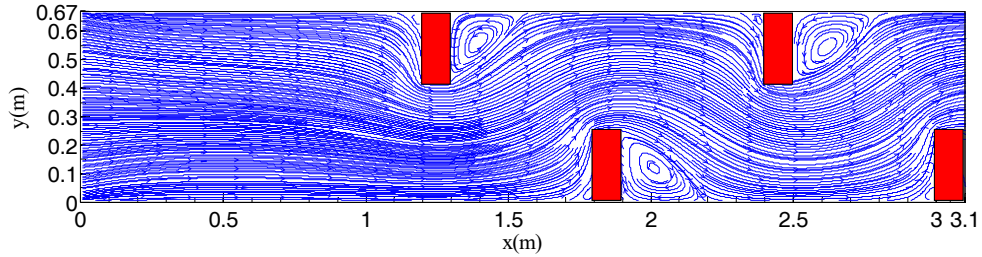
Şekil 9. Kanal orta ekseninde ölçülen ve hesaplanan su derinliklerinin karşılaştırması



Şekil 10. Girişten çıkışa belirli kesitlerde ölçülen ve hesaplanan su derinliklerinin karşılaştırması

Bu durumu daha iyi gözleyebilmek için belirli en-kesitlerde ölçülen ve hesaplanan su derinlikleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Birinci mahmuzdan hemen önce ($x = 1$ m) hesaplanan ve ölçülen değerler tam olarak örtüşmektedir. İkinci mahmuzdan hemen sonra ($x = 2$ m) mahmuza ters yönde bir farklılaşma görülmektedir. Üçüncü mahmuz ($x = 2.5$ m) sonrasında sapmalar artmakta ve dördüncü mahmuzdan sonra ($x = 3$ m) hesaplanan su yüzü profili ile ölçümler belirgin şekilde ayrılmaktadır. Süreklilik denkleminin kanal boyunca hacim korunumunu tam olarak sağladığı düşünülürse, mahmuzlar arasında sağa-sola savrulan akımda düşey ivmelenme artmakta ve SAD çözümü kanal içinde momentum korunumunu sağlayamamaktadır.

Sayısal çözümden elde edilen derinlik ortalamalı hızlardan akım çizgileri elde edilmiş ve sonuç Şekil 11'de sunulmuştur. Yatay düzlemde mahmuzlardan sonra oluşan büyük vorteks yapıların belirgin bir şekilde canlandırıldığı görülmektedir. Ancak, kanal tabanına yakın, düşey düzlemlerde oluşan vortekslerin varlığı ve SAD çözümünün bunlara duyarsız kalacağı da bilinmektedir.



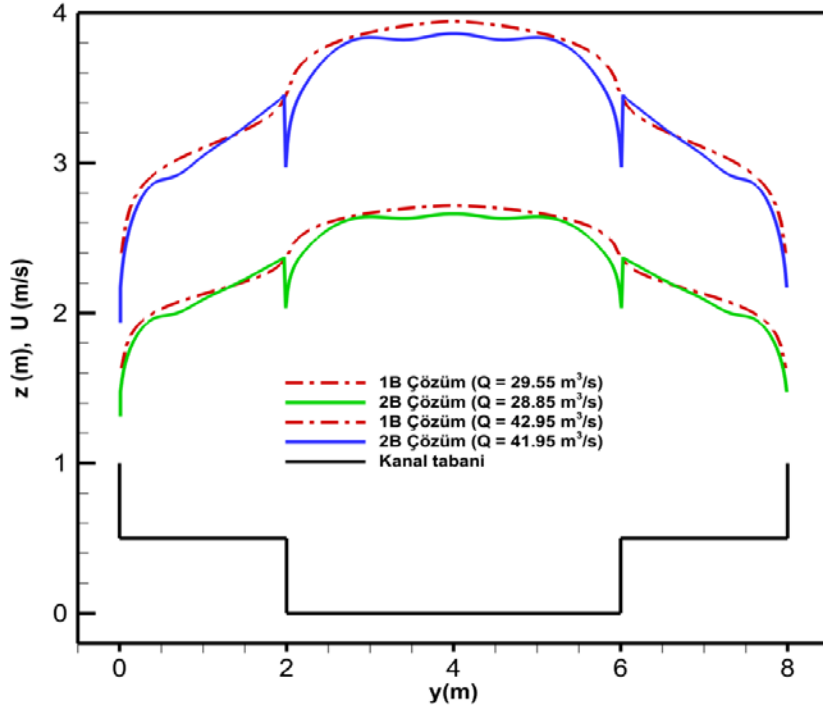
Şekil 11. Derinlik ortalamalı hızlardan elde edilen akım çizgileri

Yukarıdaki gözlemlerden SAD çözümlerinin akım içinde bir adet engelin neden olacağı 3-Boyutluluktan çok fazla etkilenmeden oldukça doğru sonuçlar verebileceğini ifade etmek mümkündür. Ancak, 3-Boyutluluğa neden olan engel sayısı arttıkça SAD çözümü ile gerçek akım arasında giderek artan bir ayrışma oluşmakta ve hesaplanan su derinlikleri ile gerçek değer arasındaki fark artmaktadır.

4.3 Bileşik Kesitli Prizmatik Kanalda Üniform Akım

Yukarıda anlatılan birinci örnekte viskoz terimler tamamen ihmal edilmişti. İkinci örnekte ise viskoz terimler hesaplamaya tam olarak katılmış fakat türbülans viskozitesi tüm akım alanı için sabit bir değerle ifade edilmişti. Açık kanal akımlarında SAD çözümü ile doğru hız profilleri hesaplamak için türbülans yapısının tam olarak modellenmesi gerekir. Bu anlamda birçok çalışma yapılmış olmakla birlikte ([12], [13], [14], [15], [16]) SAD çözümleri için henüz genel kabul görmüş bir derinlik integralli türbülans modeli yoktur. Yapılan bazı çalışmalarda ise bir model tanımlamak yerine ampirik ifadelerle deneysel verilere uyum sağlanması denenmiştir [17]. Buradaki zorluk, gerçekte 3-Boyutlu olan türbülansın 2-Boyuta indirgenmesinin vorteks oluşumu gibi temel türbülans dinamikleri ile çelişmesidir.

Açık kanal akımları, kanal duvarları ve serbest yüzey ile sınırlanmış bir iç-akımdır ve sınır tabaka oluşumları akımın genel karakterini belirler. Akım içindeki bir noktada türbülans, en basit ifade ile, o noktanın akımı sınırlayan tüm duvarlara olan ağırlıklı uzaklığına bağlıdır. Genel olarak SAD, akımın üçüncü boyutuna, yani derinlik boyunca değişimlere duyarlıdır. Dolayısıyla, SAD çözümünde türbülans modelleneneye ihtiyaç duyulan en öncelikli bilgi, akımı sınırlayan duvarların uzaklığı veya türbülans için bir karışım uzunluğunun (mixing length) tanımlanmasıdır. Bu tanım akımın gerçekleştiği 3B ortamı yeterince doğru temsil edebilmelidir. Bu bağlamda, prizmatik kanallarda üniform akım için daha önce yapılan bir çalışmadan [18] yararlanılacaktır. Bu çalışmada öncelikle akım üniform varsayılmakta ve bu nedenle değişkenlerde akım (x -) yönünde bir değişim söz konusu olmamaktadır. Ancak kesit içinde akımın 3 hız bileşeni de hesaplanmaktadır. Akım üniform olsa da türbülansın yöne duyarlı karakteristiği nedeniyle köşelerde türbülansın beslediği ikincil akımlar oluşmaktadır. Akım yönüne dik bir kesit içinde birbirine ters dönen vorteks yapıları oluşmakta ve ana akım hız dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle bir kesit içinde türbülansın beslediği ikincil akımlar da ilgili momentum denklemlerinin çözümü ile hesaplanmaktadır. Söz konusu çalışmada [18] tanımlanan türbülans modeli kanalın 3-Boyutluluğunu temsil eden bir 'türbülans karışım boyu' tanımlamakta ve ayrıca türbülans gerilmelerini tanımlarken deformasyon ifadeleri ile gerilmeler arasında lineer olmayan bir ilişki kurmaktadır. Böylece, ikincil akımlar ve onların neden olduğu, kesit içinde momentumun yeniden dağılımı doğru olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 12. 1B SAD ve 2B çözümlerden elde edilen derinlik ortalamalı hızların karşılaştırılması

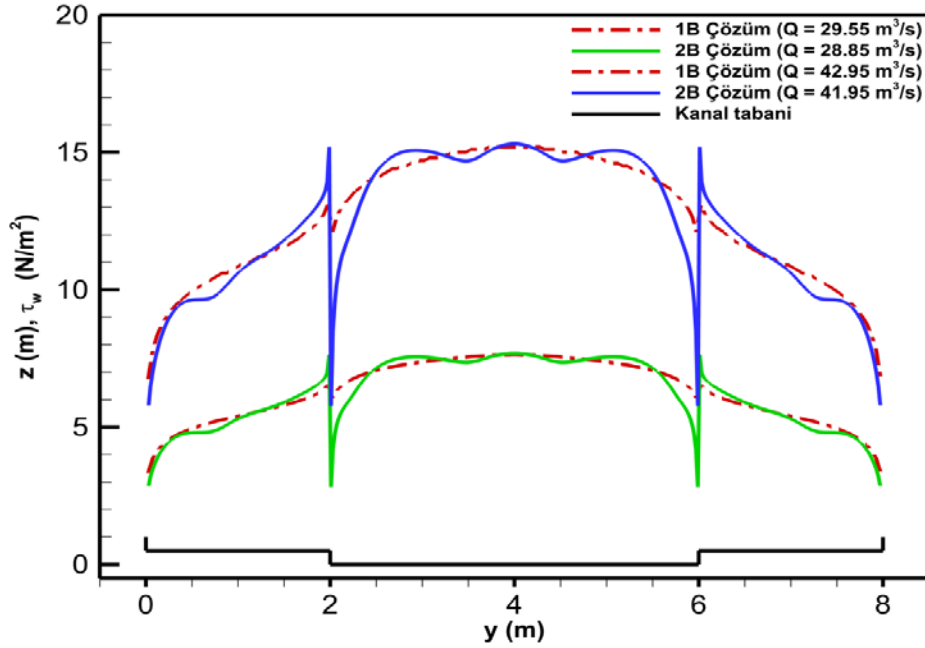
Bu çalışmada kullanılan SAD üniform akım için basitleştirilebilir. Bu durumda x -ile değişen tüm terimler atılmış olacaktır. Sadece ana akım yönündeki hızın kanal enine değişimi $u(y)$ hesaplanacaktır. Denklem (4)'te verilen gerilme ifadesinin 1B akım için sadeleşmiş hali

$$\tau_{x,y} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (9)$$

olarak yazılır. Türbülans viskozitesi ise

$$\nu_t = l_m^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (10)$$

olarak tanımlanır. Burada l_m kanal kesiti içinde, önce [18]'de tanımlandığı şekilde hesaplanır ve daha sonra düşey yönde tabandan su yüzüne kadar ortalaması bulunarak elde edilir. Diğer bir ifade ile l_m derinlik integral türbülans karışım uzunluğudur.



Şekil 13. 1B SAD ve 2B çözümlerden elde edilen cidar gerilmeleri karşılaştırması

Bileşik bir kanalda üniform akım için 1B SAD sonuçları ile 2B sayısal çözüm sonuçları Şekiller 12 ve 13'te sunulmuştur. Burada 2B çözümde herhangi bir sadeleştirme yapılmadan, 3-hız bileşeni için 3-momentum denklemi de çözülmüş ve ikincil akımlar da gerçeğe uygun şekilde temsil edilmiştir. Şekil 12'de iki farklı eğim için hesaplanan derinlik

ortalamalı hız dağılımları kanal kesiti ile birlikte gösterilmiştir. Sürekli çizgiler 2B çözüm, kesikli noktalı çizgiler 1B SAD çözümdür. Her iki eğim için hesaplanan debi değerleri de şekil üzerinde gösterilmiştir. Bu aşamada hiçbir kalibrasyon yapılmadan sunulan bu karşılaştırmada 1B SAD ile 2B çözümlerin verdiği debiler arasındaki fark % 2 den azdır. Yeterli miktarda deneysel veri kullanılarak bazı sürtünme parametreleri kalibre edildiği takdirde, bu farkın çok daha düşük değerlere çekilmesi mümkündür.

Aynı akım durumları için hesaplanan cidar gerilmeleri karşılaştırması Şekil 13'te sunulmuştur. 1B çözümün cidar gerilmelerini oldukça başarılı bir doğrulukla hesapladığı gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu yazıda SAD için sayısal çözüm yapılarak 3 ayrı akım durumu incelenmiş ve matematik model olarak SAD'nin hangi fiziki koşullar için yeterli/güvenilir sonuçlar vereceği tartışılmıştır. Hiperbolik karakterli olan SAD, akım değişkenlerinde süresiz çözümlere izin vermektedir. Birinci durum olarak çalışılan kanal içindeki engel etrafından geçen kritik-üstü akım çözümünde sayısal yöntemin bu yöndeki yetenekleri gözlenmiştir. Engel sonrasında oluşan 'duran dalgalar' ve engel yukarısında oluşan hidrolik sıçrama bir süresizlik örneği olarak hesaplanmıştır.

Fiziksel olarak SAD'nin geçerli olabilmesi için en temel koşul, akım alanının yataydaki boyutunun düşey boyuttan (derinlikten) yeterince (5~6 kat) büyük olması gerektiğidir. Düşey yöndeki momentum denkleminin kullanılmaması ve düşey ivmenin sıfırlanması sonucu hidrostatik basınç dağılımı da kabul edilmiş olmaktadır. Bu nedenle, akım alanı içindeki bir engel etrafındaki akım SAD ile çalışılırsa, engel yüzeylerindeki basınçların ve dolayısı ile toplam sürükleme kuvvetinin doğru hesaplanamayacağı öngörülebilir. Aslında, SAD çözümlerinden beklenen birincil çıktı su derinliğidir. Su derinliği yeterli bir doğrulukta hesaplanmışsa, derinlik ortalamalı hızlar da doğru olacaktır. Ancak ikinci örnek akımda olduğu gibi tekrarlanan engellerden aşılması durumunda, 3B'luluğun etkileri ile bir noktadan sonra su derinliğinin de hatalı hesaplandığı gözlenmiştir.

Üçüncü örnek durum olarak seçilen bileşik kesitli kanal içindeki üniform akım çözümünde oldukça basit bir türbülans modeli kullanılmıştır. Akım içindeki bir noktanın cidarlardan ağırlıklı uzaklığını hesaplayan bir türbülans karışım uzunluğu oldukça başarılı hız profilleri elde edilmesi için yeterli olmuştur. Bu sonuç, 2B SAD çözümlerinde de tatmin edici türbülans modellerinin geliştirilebileceğine işaret etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Toro, E.F., Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows, Chichester. John Wiley & Sons, 2001.
- [2] Toro, E.F., Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. A Practical Introduction, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2009.

- [3] İşcen, B. N., Computer Code Development for Numerical Solution of Depth Integrated Shallow Water Equations to Study Flood Waves, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [4] Alcrudo, F. and Garcia-Navarro, P., A High-Resolution Godunov Type Scheme in Finite Volumes for the 2D Shallow Water Equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16, 489-505, 1993.
- [5] Roe, P. L., Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, *Journal of Computational Physics*, 43, 357-372, 1981.
- [6] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, Pearson. Prentice Hall, 2007.
- [7] Stoker, J. J., *Water Waves, the Mathematical Theory with Applications*, London. Wiley, 1957.
- [8] Wu, C., Huang, G., and Zheng, Y., Theoretical Solution of Dam Break Shock Wave, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), 1210-1215, 1999.
- [9] Zoppou, C. and Roberts, S., Explicit Schemes for Dam-Break Simulations, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 11-34, 2003.
- [10] Brufau, P. and Garcia-Navarro, P., Two-Dimensional Dam Break Flow Simulation, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 33, 35-57, 2000.
- [11] Yılmaz, B., Development and Validation of Two-Dimensional Depth-Averaged Free Surface Flow Solver, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [12] Canelas, R., Murillo, J. and Ferreira, R., Two-Dimensional Depth-Averaged Modelling of ,Dam-Break Flows Over Mobile Beds, *Journal of Hydraulic Research*, 51(4), 392-407, 2013.
- [13] Raisee, M., Jafari, A., Babaei, H. and Iacovides, H., Two-Dimensional Prediction of Time Dependent, Turbulent Flow Around a Square Cylinder Confined in a Channel, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62, 1232-1263, 2010.
- [14] Wu, W., Sanchez, A. and Zhang, M., An Implicit 2-D Shallow Water Flow Model on Unstructured Quadtree Rectangular Mesh, *Journal of Coastal Research*, 59, 15-26, 2011.
- [15] Wu, W., Wang, P. and Chiba, N., Comparison of Five Depth-Averaged 2-D Turbulence Models for River Flows, *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 51(2), 183-200, 2004.
- [16] Yu, C. and Duan, J., Two-Dimensional Depth-Averaged Finite Volume Model for Unsteady Turbulent Flow, *Journal of Hydraulic Research*, 50(6), 599-611, 2012.
- [17] Fe, J., Navarrina, F., Puertas, J., Vellando, P. and Ruiz, D., Experimental validation of two depth-averaged turbulence models, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60, 177-202, 2009.
- [18] Aydın, İ., Nonlinear Mixing Length Model for Prediction of Secondary Currents in Uniform Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(2), 146-153, 2009.

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİMİ VE TÜRKİYE*

Mikdat KADIOĞLU**

Prof. Dr., İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü Maslak, İstanbul
kadioglu@itu.edu.tr

ÖZET

Günümüzde tüm dünyada şehirleşme hareketleri; kırsal kesimden olan göçler ile birlikte hızlanmakta, nüfus yoğunluğunun aşırı bir şekilde artması ve değişen yaşam standartları sonucu daha çok sanayi üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların sonucunda da artan şehirleşme, özellikle sanayi ve yerleşim bölgelerinden çıkan sera gazları ile çevre ve atmosferi büyük miktarda kirlenmekte ve küresel ölçekte havanın ısınma eğilimi de giderek artmaktadır. Böylece, canlı küreden (biyosferden) yukarı atmosfere (stratosfere) kadar olan kısım başta olmak üzere, günümüzde Dünya atmosferinin kirlenmesi giderek artmaktadır. Bütün bunlar, doğayı tahrip ederek kentlerin iklimini değiştirmekle birlikte su, kara ve havadaki yaşamı tümüyle tehdit eden çevre problemlerini de beraberinde getirmektedir.

Böylece son yıllarda sadece tropiklerde fırtınaların sayısı ve şiddetinde artış yok; Türkiye gibi tropiklerin dışındaki ülkelerde de şiddetlenen gök gürültülü sağanak yağışlardan dolayı, şehirlerdeki ani sellerin sayısı ve şiddetinde artışlar var. Artık deprem, sel vb. tehlikeler, hızla artan çarpık yerleşim bölgelerinde daha fazla afete dönüşebiliyor.

Bu nedenle, İklim ve İklim Sistemi, Tarihsel İklim Değişimleri, Sera Gazları, Atmosferin Sera Etkisi, Günümüzde İklimde Gözlenen Değişimler, Tahmin ve Beklentiler gibi konular ele alınacaktır. Böylece iklimin temel kavramları tanıtılmış olacak, mevcut tehlikenin nedenleri ile birlikte şu anki ve gelecekteki boyutları hakkında bir bakış açısı kazandırılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Hava, iklim, iklim değişimi, Türkiye, iklim değişiminin etkileri.

Global Climate Change and Turkey

ABSTRACT

Rising global temperatures will bring changes in weather patterns, rising sea levels and increased frequency and intensity of extreme weather events. Climate change impacts will range from affecting agriculture- further endangering food security-, sea-level rise and the accelerated erosion of coastal zones, increasing intensity of natural disasters, species extinction and the spread of vector-borne diseases. Climate change is therefore the greatest environmental challenge facing the world today. The effects will be felt here in the Turkey and internationally there may be severe problems for people in regions that are particularly vulnerable to change.

The recent Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) leaves us in no doubt that human activity is the primary driver of the observed changes in climate. The main human influence on global climate is emissions of the key greenhouse gases. The concentrations of these gases in the atmosphere have now reached levels unprecedented for tens of thousands of years.

For Turkey, climate change means hotter, drier summers (more droughts, heat waves, wild fires, etc.), milder and drier winters, higher sea levels and an increased flood risk to coastal areas. Across the globe, there will be more intense heat waves, droughts and more flooding. There may be severe problems for regions where people are particularly vulnerable to changes in the weather. Food shortages and the spread of disease are commonly predicted. The social, environmental and economic costs of climate change could be huge.

There are also enormous opportunities if we are willing to take action. Government, business and individuals all have a part to play, and all of us can benefit from rising to the challenge of climate change. This paper briefly explains what climate change means for the world and Turkey and what we should do about it.

Keywords : Climate, climatic change, turkey, impacts of climate change

** İletişim yazarı

*Bu makale kısmen "Kadioğlu, M., 2008: Günümüzden 2100 Yılına İklim Değişimi, s.27-46, TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu, 13-14 Mart, 2008 Ankara." dan alınmıştır 9-11 Nisan 2009 tarihlerinde Kocaeli'nde düzenlenen "II Enerji Verimliliği Kongresi"nde bildiri olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

İnsanlığın son yüz yıl içerisinde karada ve suda yaptığı ve hâlâ yapmakta olduğu tahribatın bir sonucu olarak toprak ve su ile birlikte havanın da bileşimi önemli ölçüde bozuldu. Artık hızla artan sanayi ve yerleşim bölgelerinden çıkan sera gazları ile çevre ve atmosferin büyük miktarda kirlenmekte ve küresel ölçekte havanın ısınma eğilimi de giderek artmaktadır. Sonuç olarak, artık insan iklimi, iklim de insanı büyük ölçüde etkiliyor. Bunun neticesinde 3. bin yılda insanlık küresel iklim değişimi problemiyle karşı karşıyadır.

Dünyanın iklim sistemi, atmosfer ve okyanusların doğal güçleri ile rüzgâr, yağmur ve sıcaklık dağılımını kontrol eder. Bu dinamik sistem, bir buzul çağından diğerine doğru sürekli değişmektedir. Geçen 3 milyon yıl içinde, iklimdeki doğal değişimleri ve ekolojik sistemlerin kendilerini bu değişimlere nasıl ayak uydurduğunu, jeolojik bulgulardan kabaca görmek mümkündür. Buzul çağlarda bitki örtüsü güneye, iki buzul çağı arasında da kuzeye doğru gelişmiştir. İnsan ve hayvanların sayısında da bu bitki örtüsündeki değişim sürekli olarak yansımıştır.

Buna rağmen, 1980'li yıllardan önce iklim değişimi konusunun önemi, kamuoyunda az iken akademik camiada büyüktü. En büyük problem "Buzul çağına ne yol açtı?" sorusuna yanıt vermektir. Aslında 19. ve 20. yüzyılların başlarındaki bir düşünceye göre iklim değişimleri geçmişe ait bir olaydı ve sadece çok uzun jeolojik zamanlarda meydana geldiğine inanılıyordu. Sonuçta, bilim insanları özellikle geçen 10 veya 20 yılda, iklimin tüm zamanlar boyunca değişerek bugünkü haline geldiği fikrinde birleşti. Ancak, son zamanlarda hükümetler de, dünya iklimi üzerindeki olası değişikliklerle ilgilenir hâle geldi.

Son 150 yıldır gittikçe artan ve aşırı miktarda tüketilen petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtları ve arazi örtüsündeki değişimler nedeniyle, büyük miktarda zararlı gaz ve parçacıklar atmosfere salınmaktadır (Şekil 1). Bunların sonucu olarak, atmosferdeki CO₂ ozon (O₃)'ü seyrelten kloroflorokarbon (CFC) gazları ve karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ile diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının miktarlarında önemli artışlar olmuştur. Bu artışlardan dolayı atmosferde kuvvetlenen sera işlemi de beraberinde günümüzdeki küresel iklim değişimi ve küresel ısınma problemi ortaya çıkartmıştır.



Böylece, yeryüzünde 19. yüzyılın ortalarından günümüze kadar olan süre içinde küresel ortalama hava sıcaklığı 0,3-0,6°C artmıştır. 1860 yılından 1996 yılına kadar kaydedilen en sıcak dört yıl ise 1990 yılından sonra olup, en sıcağtan itibaren sırasıyla 1995, 1990, 1991 ve 1994 yıllarıdır. Böylece 1990'lı yıllar en sıcak 10 yıldır ve 1998'de 1961-90 ortalamasından 0,57°C daha sıcak olmuştur. Araştırmalara göre, gelecek 40 yıl içindeki her 10 yılda 0,1°C'den daha fazla miktarda küresel ısınmanın kuvvetlenerek devam edeceği tahmin edilmektedir (Şekil 2).

Diğer bir deyişle, sanayi devrimi öncesi dünyanın ortalama hava sıcaklığı 15°C idi. Yani yaşama uygun hava sıcaklığını atmosferin sera etkisine borçluyuz. Atmosferin sera etkisi olmasaydı dünyada ortalama hava sıcaklığı -18°C olacaktı. Yani, atmosferin sera etkisi hava sıcaklığını 33°C arttırmıştır. Sanayi devriminden sonra atmosfere salınan sera gazları nedeniyle de dünyanın ortalama hava sıcaklığı 15,6°C'ye yükselmiştir.

Yani dünyada bugün ortalama 15 °C hava sıcaklığına göre bildiğimiz bir şekilde yaşam artık değişmek zorundadır. Şimdi temel problemimiz, insan etkinlikleri nedeniyle atmosferin güneş enerjisini yutması ve yayılması şeklinin değiştirmiş olmasıdır. Bunun potansiyel tehlikeleri sadece

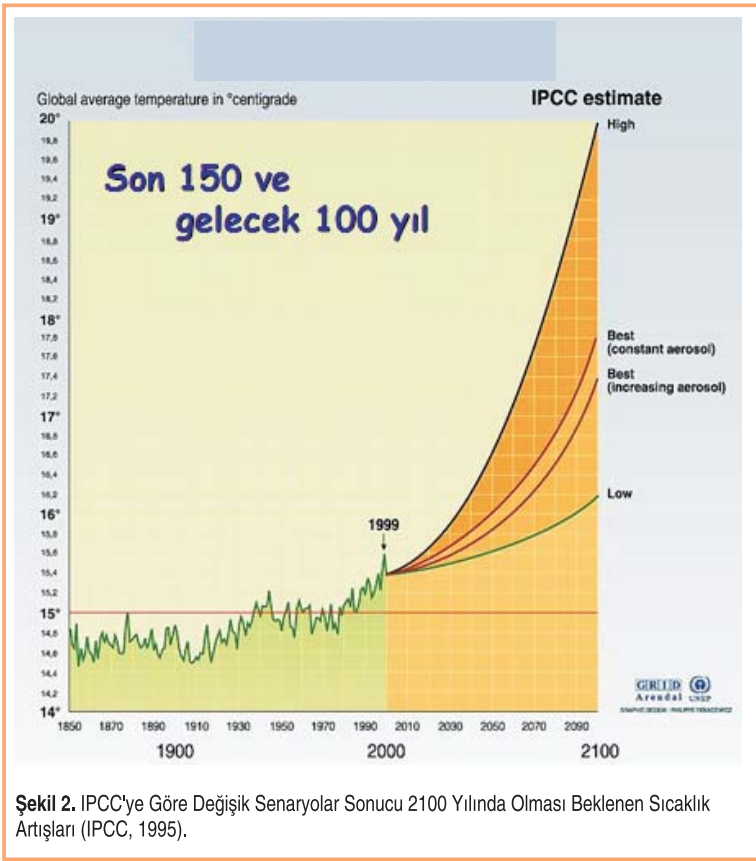
havaı ısıtarak bizi terletmesi vb. problemler değildir. Örneğin; yükselen deniz su seviyesi azalan toprak neminin çok daha sosyo-ekonomik etkileri olabilecektir. Aslında insanlar hızlı bir iklim değişimine kendini uydurabilir ve ondan korunabilir, fakat bitkiler ve hayvanlar bu değişimlere ayak uyduramadığı için insanların besin zincirini de oluşturan tüm ekolojik sistem tehlikeydedir.

Özetle, fosil yakıtları ve tarımsal atıkların yakılmasıyla beraber büyük miktarda aerosollar ve parçacıklar atmosfere salınıyor. Tarımsal faaliyetler için açılan alanlar, orman alanlarının yok edilmesi, ormansızlaşma ve çölleşmeyle beraber gelen problemler, uçakların neden olduğu kimyasallar ve diğer etkenler ile iklimleri değiştiriyoruz. Kuzeyin zengin ülkeleri yüksek endüstriyel karbon üretimleri ile Güneyin fakir ülkeleri ise daha çok kötü arazi kullanımı ile bu probleme katkıda bulunuyor.

Sonuç olarak, yer örtüsünü değiştirerek ve çok büyük miktarlarda fosil yakıtını yakarak iklimi hızla değiştiriyoruz. Diazot monoksitler, karbondioksit, metan ve halokarbonlar, kloro-flora karbonlar belli başlı sera gazlarıdır. Bunlarda en büyük miktarı da karbondioksit oluşturmaktadır. Karbondioksitin kaynağı petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardır. Metan ise, pirinç ekimi vb. gibi bazı tarımsal faktörler, hidroelektrik barajlar, bataklıklar ve çöplüklerden gelir. Bunlar da sürekli olarak atmosferin sera etkisini kuvvetlendiriyor ve dünyayı ısıtıyor.

Bu nedenle, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde "iklim değişimi" sadece atmosferin kimyasal bileşenini değiştiren (doğal değil) insani nedenlerden dolayı iklimde görülen değişimlere atıfta bulunur. "Küresel ısınma" atmosferde artan sera gazlarının potansiyel etkilerinden sadece birini ifade eden bir terimdir. Diğer bir deyişle, şu anki küresel ısınma da yapay iklim değişiminin en belirgin semptomlarından biri "ısınmadır".

Yaklaşık olarak son 150 yıldır gittikçe artan ve aşırı miktarda tüketilen petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtları ve arazi örtüsündeki değişimler nedeniyle, büyük miktarda zararlı gaz ve parçacıklar atmosfere salınmaktadır. Bunların sonu olarak, atmosferdeki CO₂ ozon (O₃)'ü seyrelten kloroflorokarbon (CFC) gazları ve karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ile diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının miktarlarında önemli artışlar olmuştur. Bu artışlardan dolayı atmosferde kuvvetlenen sera işlemi de beraberinde



Şekil 2. IPCC'ye Göre Değişik Senaryolar Sonucu 2100 Yılında Olması Beklenen Sıcaklık Artışları (IPCC, 1995).

günümüzdeki küresel iklim değişimi ve küresel ısınma problemini ortaya çıkartmıştır.

Diğer bir deyişle günümüzde tüm dünyada şehirleşme hareketleri, kırsal kesimden olan göçler ile birlikte hızlanmakta, nüfus yoğunluğunun aşırı bir şekilde artması ve değişen yaşam standartları sonucu daha çok sanayi üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların sonucunda da artan şehirleşme, özellikle sanayi ve yerleşim bölgelerinden çıkan sera gazları ile çevre ve atmosfer büyük miktarda kirlenmekte ve küresel ölçekte havanın ısınma eğilimi de giderek artmaktadır. Böylece, canlı küreden (biyosferden) yukarı atmosfere (stratosfere) kadar olan kısım başta olmak üzere, günümüzde Dünya atmosferinin kirlenmesi giderek artmaktadır. Bütün bunlar, doğayı tahrip ederek kentlerin iklimini değiştirmek ile birlikte su, kara ve havadaki yaşamı tümüyle tehdit eden çevre problemlerini de beraberinde getirmektedir (Kadıoğlu, 2001).

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİMİNİN İŞARETLERİ

Halk arasında, iklim değişikliklerinin daha belirginleşmesi ile mevsimlerin sürelerinde bir değişiklik olup olmadığı ve hatta “mevsimler kaydı mı?” gibi sorular daha çok gündeme gelmektedir. Diğer bir deyişle, meteorolojinin çok farklı konuları olan iklim ve hava şartları ülkemizde birbirine çok karıştırılmaktadır.

Hava şartları ile iklim arasındaki farkı kısaca şöyle ifade edebiliriz: Hava şartları, belirli bir zaman ve kısa bir dönemde gözlenen hava olaylarıdır; fakat iklim, hava şartlarının uzun bir dönem boyunca ortalamaları veya eğilimleridir. Uzun yıllar boyunca bir yerin iklimini belirleyen bu hava durumları içinde birçok aşırı sıcaklıklar, soğuk hava dalgaları, kuraklıklar, seller ve fırtınalar da vardır.

Son yıllarda küresel iklim değişiminden dolayı hava ve iklim parametrelerinde gözlenen değişimler şunlardır:

- Buharlaşma ve yağmur miktarı artıyor
- Yağmurun büyük kısmı sağanak şeklinde oluyor
- Tundralar eriyor
- Mercanlar beyazlıyor
- Buzullar geriliyor
- Denizlerdeki buzullar küçülüyor
- Deniz su seviyesi yükseliyor
- Orman yangınları artıyor
- Fırtına ve sel hasarları artıyor.

Ayrıca hava şartlarının günlük hayatta kullandığımız astronomik mevsimlere uyması beklenmektedir. Hâlbuki

günlük hayatta kullandığımız astronomik mevsimler belirlenirken ne hava şartları ne de iklim özellikleri göz önüne alınmıştır. Bu nedenle de, örneğin, resmen yaz mevsiminin (21 Haziran'da) başlamasından günler sonra havaların hâlâ yeterince ısınmadığı sık sık gözlenebilmektedir. Genellikle bu gibi durumlarda kamuoyunda mevsimlerin değil de "Bu yaz 13 gün gecikti" şeklinde hava şartlarının “yanlışlığı” veya “mevsimlerin kaydığı” üzerinde durulmakta ya da iklimin değiştiği şeklinde spekülasyonlar yapılmaktadır. Hâlbuki hava şartları astronomik mevsimlere uymak zorunda değildir, çünkü bu havanın doğasına aykırıdır (hava, “havai” bir şeydir!).

Özetle söylemek gerekirse;

- Hava ve iklim şartları aynı şeyler değildir.
- Hava şartları mevsimlere uymak zorunda değildir.
- Meteoroloji de rekor kırar.
- “Normal hava” diye bir şey yoktur.

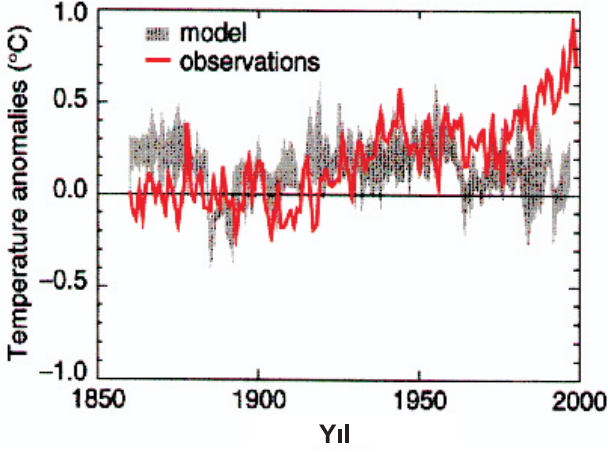
Bununla birlikte günümüzde değişen mevsimlerin bazı işaretleri şunlardır:

- Şimdi ABD'ye ilkbahar üç hafta daha erken geliyor.
- İngiltere'de 20 kuş türü, daha önceki yıllara göre yuvalarını dokuz gün önce yapmaya başladı.
- İngiltere'nin güneyinde Marsham ailesi 1736'dan beri ilkbaharın işaretlerini kayıt etmektedir. Bu kayıtlara göre meşe ağacının yaprak açmasında en erken davrandığı yıllar 1990'larda oldu.
- Sıcakların artması ile ağaçlar ve sincap vb. küçük hayvanlar Kanada'da kuzeye doğru göç ediyor.
- İngiltere'de geçen 30 yılın her 10 yılında sonbaharın 2 gün geciktiği görülmüştür. İlkbaharın ilerlemesi ise her on yılda 6 gün olmuştur.

Genel ve bilimsel olarak küresel iklim değişimine işaret olarak şunları kabul ederiz:

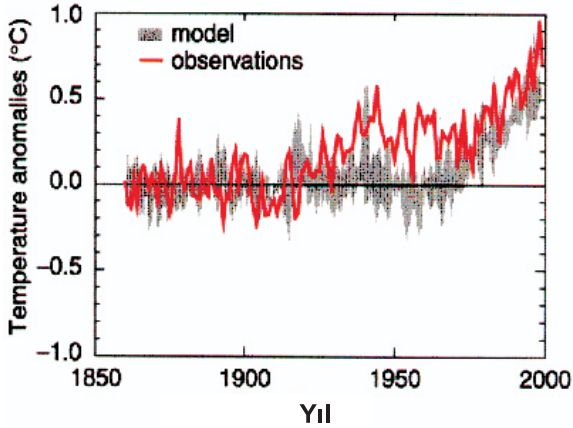
- Buzulların eriyerek, kutuplara doğru çekilmesi ile birlikte yüksek dağların tepelerindeki buzulların ve kar örtüsünün azalması.
- Deniz su seviyelerinin yükselmesi.
- Sıcak havayı ve suyu seven tropikal bitki ve balıkların kutuplara doğru yayılması. Artan iklim göçmenleri ve mülteci problemleri.
- Havadaki kirleticilere karşı hassas olan narin kuş türlerinin azalması.
- Ağaçlardaki yaş halkalarının daha hızlı bir büyüme göstermesi.
- Son 1400 yılın dünyanın en sıcak yılları olarak kabul edilen 1990'lı yılların ardı sıra gelmesi.

(a) Doğal



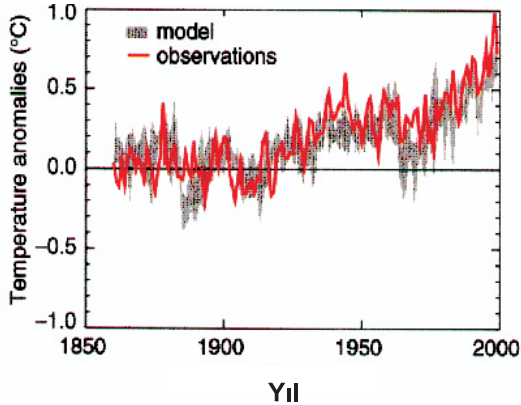
Şekil 3a. Tüm Nedenlerden Dolayı Gözlenen (kırmızı) ve Doğal Nedenlerin Sebep Olduğu Isınmaların (siyah) Yıllık Değişimi (IPCC, 2001)

(b) Antropojenik



Şekil 3b. Tüm Nedenlerden Dolayı Gözlenen (kırmızı) ve Sadece İnsan Etkinliklerinin Sebep Olduğu Isınmaların (siyah) Yıllık Değişimi (IPCC, 2001)

(c) Etkenler



Şekil 3c. Tüm Nedenlerden Dolayı Gözlenen (kırmızı) ile Doğal ve İnsan Etkinliklerinin Birlikte Sebep Olduğu Isınmaların (siyah) Yıllık Değişimi (IPCC, 2001)

Kamuoyunda küresel iklim değişimi daha çok ısınma ile bilinmekte ve küresel ısınma şeklinde adlandırılmaktadır. Çünkü aşağıda sıralandığı bir şekilde son 1400 yılın en sıcak yazları ile dünyanın ortalama hava sıcaklığı son yıllarda yükseliyor:

- Son 140 yılda (aletsel kayıtlara göre) artış $0,7 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ oldu.
- 1860 yılından beri görülen en sıcak 20 yılın 19'u 1980'den sonra gerçekleşti. 1860 yılından beri görülen en sıcak 20 yılın 11'i ise 1990'dan sonra gerçekleşti.
- 1998 yılı aletsel kayıtlara göre en sıcak yıl ve ağaç halkası, buz örneklerine göre son 1000 yılın en sıcak yılı; 2002 ise ikinci en sıcak yıldır.
- Son 50 yıl, buzul kayıtlarına göre son 6000 yılda gözlenen en sıcak yarım yüzyıldır.
- Okyanus sıcaklık kayıtlarına göre 1950'li yılların ortalarından 1990'ların ortalarına kadar önemli bir ısınma yaşandı.

21. Yüzyıldaki ısınma gerçek mi veya bu ısınmayı sadece doğal nedenler açıklayabilir mi? Gibi soruların yanıtı IPCC tarafından net bir şekilde verilmiş ve literatürde büyük kabul görmüştür. IPCC'nin bu konudaki grafiksel açıklaması için Şekil 3a, b ve c'ye bakınız. Bu grafiklerde gözlemler (şu anda dünya üzerinde gözlediğimiz ısınma) kırmızı çizgiler ile bu değişimleri açıklamak için yapılan modelleri ise siyah çizgiler temsil etmektedir.

Eğer şu anki ısınma sadece doğal (natural) nedenlerden olsaydı, yani dünyanın eksenini, güneş patlamaları gibi şeyler den kaynaklıysaydı durum Şekil 3a'daki gibi olacaktı. Ama burada gözlenen, aradaki fark da bir fark vardır; işte o fark insan etkisidir (anthropogenic). Benzer şekilde, sadece insana bakarak, yani doğal nedenleri ihmal ederek şu anki ısınmayı tam olarak açıklayamayız. Ama tüm etkenleri dikkate aldığımız (all forcing), yani doğal nedenler (Şekil 3a) ile insani nedenleri eklediğimiz (Şekil 3b) zaman şu andaki ısınmayı (Şekil 3c'den görüldüğü gibi) tam olarak açıklayabiliyoruz.

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİMİNİN OLUŞTURDUĞU RİSKLER

İnsanları korkutan şey iklim değişimi teorisi değildir. Bu teori küresel iklim değişiminin pozitif ve negatif etkileri olacaktır. Pozitif etkiler arasında kuzey enlemlerde tahıl veriminin artması gibi şeyler; fakat insanları doğal olarak olası negatif etki potansiyeli korkutmaktadır.

Bizleri korkutan şey iklim değişimi teorisinin kendisi değildir. Bu teori ve gözlemler, küresel iklim değişiminin pozitif ve

negatif etkileri olacağı belirtilmektedir. Pozitif etkiler arasında kuzey enlemlerde tahıl veriminin artması gibi şeyler sayılabilir. Fakat insanları, doğal olarak orta ve güney enlemlerin sıcak iklimlerde yaşanan ve yaşanabilecek olası negatif etkiler korkutmaktadır.

Özetle, IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli) tarafından 2030 yılı için yapılan senaryolara göre artacak olan olası iklimsel tehlikeler (uç meteorolojik olaylar) şunlardır:

- Sıcak hava dalgaları,
- Orman yangınları,
- Tarımsal hasarlar,
- Kuraklık,
- Şiddetli yağışlar (ani sel ve şehir sellerinde artış),
- Tropikal fırtınaların, yani tayfunların sayısı ve şiddeti,
- Tarım, agro-kültür, hayvancılık, tatlı su depolamasının üzerindeki etkiler,
- Sıtma ve malarya gibi hastalıkları taşıyan böceklerin normalde buldukları bölgeden çıkarak yayılması.

Böylece su, kara ve havadaki yaşamı tümüyle tehdit eden çevre problemlerinde büyük artışlar olabilecek ve tarım ile beraber ekonomimiz, insan sağlığı ve yaban hayatı da kötü bir şekilde etkilenebilecektir (Şekil 4).

Atmosferik sera etkisi kuvvetlendikçe kutuplar ve çevresi, tropikal bölgeden daha fazla ısınacağı düşünülmektedir. Türkiye'nin de yer aldığı orta enlemlerdeki alçak basınç merkezleri, atmosferik cephe, jet akımları ve benzerinin "yakıtını", gücünü kutuplar ile ekvator arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Kutuplar ile ekvator arasındaki sıcaklık farkının azalması jet akımlarını ve dolayısı ile daha az ve zayıf (orta enlem) fırtınasına neden olacaktır. Ayrıca yapılan bazı çalışmalar fırtınaları takip ettiği yolların da Türkiye'den yukarı çok daha kuzey enlemlerine çekileceğini göstermektedir.

Her ne kadar alçak basınç merkezlerinin ve atmosferik cephe, jet akımları ve benzerinin neden olduğu fırtına vb. olaylarda azalmalar olursa da, küresel ısınma nedeniyle havada miktarı aratan su buharı nedeniyle alçak basınç ve cepheye bağlı olmayan, daha çok ilkbahar ve yaz aylarında görülen kısa süreli, sağanak yağışların artacağı beklenmektedir. Bu tür düzensiz, ani ve şiddetli yağışların seller, heyelan ve erozyonu artırması beklenmektedir. Ayrıca, Avrupa'nın kuzeyin de olduğu gibi Türkiye'nin de kuzeyinde daha fazla sele maruz kalması beklenirken güney kısımlarında daha fazla kuraklık beklenmektedir.

Böylece, Küresel İklim Modellerinin tahminleri, zaten fakir olan güney ülkelerinde, sel, kuraklık ve fırtınaların sayı ve şiddet bakımından da artacağını göstermektedir. Diğer bir

deyişle, son yıllarda giderek artan şiddette ve sıklıkta, sel, kuraklık ve fırtınalar gibi meteorolojik afetlerin küresel iklim değişimi ile birlikte daha da artması beklenmektedir.

Son yıllarda sadece tropiklerde fırtınaların sayısı ve şiddetinde artış yok; Türkiye gibi tropiklerin dışındaki ülkelerde de şiddetlenen gök gürültülü sağanak yağışlardan dolayı, şehirlerdeki ani sellerin sayısı ve şiddetinde de artış var. Artık deprem, sel vb. tehlikeler, hızla artan çarpık yerleşim bölgelerinde daha fazla afete dönüşebiliyor. Artık deprem, sel vb. tehlikeler, hızla artan çarpık yerleşim bölgelerinde, küresel iklim değişimi gibi bilimsel uyarıları ve modern afet yönetimini ciddiye almayan ülkelerde daha fazla afete dönüşebiliyor.

Sonuç olarak günümüzde bilimsel anlamda hiçbir şüphe yok; artık insan iklimi değiştiriyor, hem de çok hızlı bir şekilde değiştiriyor; dünyada jeolojik evrelerde hiç gözlenmemiş kadar hızla değiştiriyor. Bu yüksek ısınma yüzünden de yeryüzünde Katrina gibi şiddetli tropikal fırtınalar, kuraklık ve ani seller şeklinde alarm zilleri çalıyor.

Bu nedenle, gelişmiş ülkeler gelecek 30, 50 ve 100 yıl hatta daha uzun sürelerde iklim değişiminin nasıl olacağını, bundan kendilerinin ve dolayısıyla dünyanın nasıl etkileneceğini bilmek amacıyla araştırmalar yapmaktadır. Bu araştırmaların sonuçlarına göre, ülkeler stratejilerini belirlemektedir. Bu nedenle, iklim değişiklikleri tahminlerine göre, bizim de ülkemizde su kaynaklarımızın, tarımımızın ve ormanlarımızın, genel olarak ekosistemin olası etkilenme derecelerini araştırmak, tespit etmek, çözüm önerileri ortaya koymak ve karar vericilere bu bilgi desteğini sağlamamız gerekir.

IPCC Küresel İklim Modelleri ile yaptığı projeksiyonlara göre 2030 yılında Türkiye'nin de büyük bir kısmı oldukça kuru ve sıcak bir iklimin etkisine girebilecektir. Türkiye'de sıcaklıklar kışın 2 °C, yazın ise 2 ile 3 °C artabilir. Yağışlar kışın az bir artış gösterirken yazın % 5 ile 15 azalabilir. Söz konusu senaryolara göre Akdeniz Havzasındaki su seviyesinde 2030 yılına kadar 18-12 cm'lik; 2050 yılına kadar 38-14 cm ve 2100 yılına kadar 65-35 cm'lik bir yükselme beklenmektedir. Küresel ısınmanın sonucu ısınarak genişleyen deniz suları ile birlikte kutup ve dağ buzullarındaki erime nedeniyle yükselen deniz suyu seviyeleri, kıyılarımızı olumsuz bir şekilde etkileyebilecektir. Küresel ısınma ile birlikte deniz seviyelerindeki yükselme de, önümüzdeki yüzyılın sonuna kadar 65-100 cm'ye ulaşabilir (Şekil 5).

İlk bakışta bu ısınmalar nedeniyle, konutlarda ısıtma amacıyla tüketilen fosil yakıtlarında ve onlar vasıtasıyla atmosfere salınan CO₂ ve benzeri sera gazlarında da azalmaya neden olacağı düşünülebilir. Fakat yapılan çalışmalar aylık ısıtma

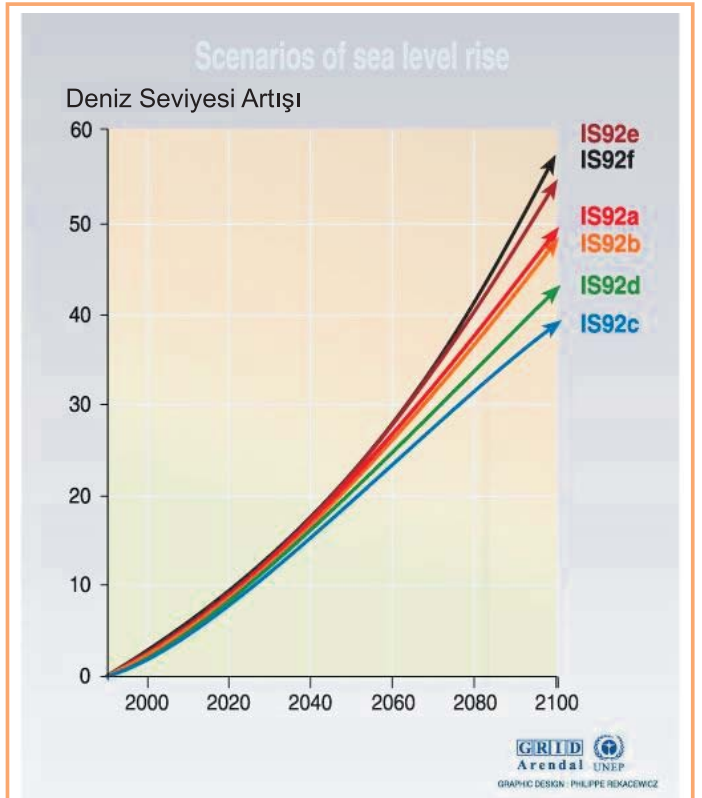


enerjisi taleplerindeki, ısınmaya bağlı düşüşlerin bahar aylarında daha fazla olacağını göstermektedir. Örneğin, İstanbul'da 1°C'lik hava sıcaklığındaki artışta ısıtma için enerji talebinde %10'luk düşüşlere neden olabileceği hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle, sıcak olan aylardaki ısıtma enerjisi talebi ısınmaya karşı daha hassastır. Örneğin, her 1°C'lik sıcaklık artışı Adana'da binaların soğutma ihtiyacını %32 arttıracığı hesaplanmaktadır.

Dünyada iklim değişimi nedeni ile (sel, kuraklık, vb.) ekstrem hava olaylarında büyük artışlar bekleniyor. Bu nedenle, 21. yüzyılda meteorolojik afetlerden dolayı olacak kayıpların önemli ölçüde artacağı bekleniyor. Örneğin, 1990'larda afetlerden dolayı görülen küresel ekonomik kayıplar 608 milyar dolardan daha fazla oldu. İklim değişimi nedeniyle, örneğin, 2050 yılına kadar ekonomik kayıpların yılda 300 milyar dolara ulaşması bekleniyor.

Yine IPCC'ye göre 1990 iklim şartlarına göre Türkiye'de bir yılda kişi başına düşen su miktarı şu an 3,070 metreküptür. Fakat bu suyun büyük bir kısmı suya ihtiyaç olan yerlerde bulunmamaktadır. İklim şartlarının değişmeyeceğini kabul etsek bile, sadece nüfus artışı nedeniyle 2050 yılında Türkiye'de bir yılda kişi başına düşen su miktarı 1,240 metreküp olacaktır. Artan nüfusumuz ile beraber bir de küresel iklim değişimi sonucu daha kurak bir iklime sahip olacağımız göz önüne alındığında 2050 yılında Türkiye'de bir yılda kişi başına düşen su miktarı 700 ile 1,910 metreküp arasında olacaktır.

Sonuç olarak suyun kısıtlı, yağışların bazı bölgeler dışında



miktar ve dağılımının düzensiz olduğu büyük şehirlerde ve tarımsal üretimde, suyun kısıtlı bulunduğu, içme, kullanma ve sulama suyu kalitesinin gün geçtikçe artan sanayi ve diğer çevre kirlilikleri neticesinde düştüğü ve küresel ısınma düşünülürse, ülkemizin kuraklığın şiddetini çok yakın bir zamanda bugünkünden çok daha fazla hissedeceği açıkça görülmektedir.

Böylece küresel iklim değişimi projeksiyonları, zaten fakir olan güney ülkelerinde, sel, kuraklık ve fırtınaların sayısı ve şiddet bakımından da artacağını göstermektedir. Diğer bir deyişle, son yıllarda giderek artan şiddette ve sıklıkta, sel, kuraklık ve fırtınalar gibi meteorolojik afetlerin küresel iklim değişimi ile birlikte daha da artması beklenmektedir.

Sonuçta ne kadar çok sera gazı, o kadar sıcak hava. Ne kadar çok sıcak hava, o kadar çok kuraklık, kıtlık, orman yangını, sıcak hava dalgası, tropikal hastalık ve düzensiz yağış...

TÜRKİYE'YE OLASI ETKİLER

Türkiye, bugüne kadar insan kaynaklı iklim değişikliği ile ilgili çalışmaları küresel ölçekte incelemiş, bunların ülkemiz coğrafyasına etkilerinin değerlendirilmesinde ise yetersiz kalmıştır. Hâlbuki iklim değişikliği senaryolarının küresel ölçekten bölgesel ölçeğe, iklim modelleri yoluyla indirgenmesi ve sonuçlarının incelenmesi; ülkemizin enerji, tarım ve su kaynakları yönetimi gibi alanlardaki gelecekle ilgili planlamalarını yakından ilgilendirmektedir.

İlk defa İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi Dr. Barış Önel, doktora çalışması olarak iklim modellerini kullanıp Türkiye coğrafyasının gelecekteki olası küresel iklim değişikliğinden, bölgesel olarak nasıl etkileneceğini ayrıntılı biçimde gösterdi.

IPCC iklim değişikliği senaryoları genellikle 2070-2100 yılları arasında, atmosferdeki karbondioksit oranlarının günümüzden en az iki kat ve daha fazla olacağı varsayımından yola çıkar. Kötü senaryolardan biri, SRES A2 olarak adlandırılır. Bu senaryoya göre model sonuçlarından üretilen sıcaklık ve yağıştaki değişimler, bugünün (1961-1990) ve geleceğin (2070-2100) iklimini temsil eden 30 yıllık periyotların farkının alınmasıyla ortaya çıkar.

Önel'un (2007) elde ettiği sonuçlara göre Türkiye üzerinde, yıllık ortalama sıcaklıktaki artış 2.5-4°C arasında olmakla beraber, özellikle Ege Bölgesi ve Doğu Anadolu'nun önemli bir kısmındaki artış 4°C'ye ulaşmakta, Ege Bölgesi üzerinde yıllık ortalamadaki bu değişimin asıl nedeni ise, yaz aylarındaki Avrupa kaynaklı sıcak hava dalgasının bu bölgemizi de etkilemesidir. Yaz aylarında sıcaklıklarda 6°C'ye varan artışlar beklenmekte (Şekil 6). Ortalama sıcaklıktaki bu düzeyde bir yükselmenin orman yangınlarından hayvan ve bitki

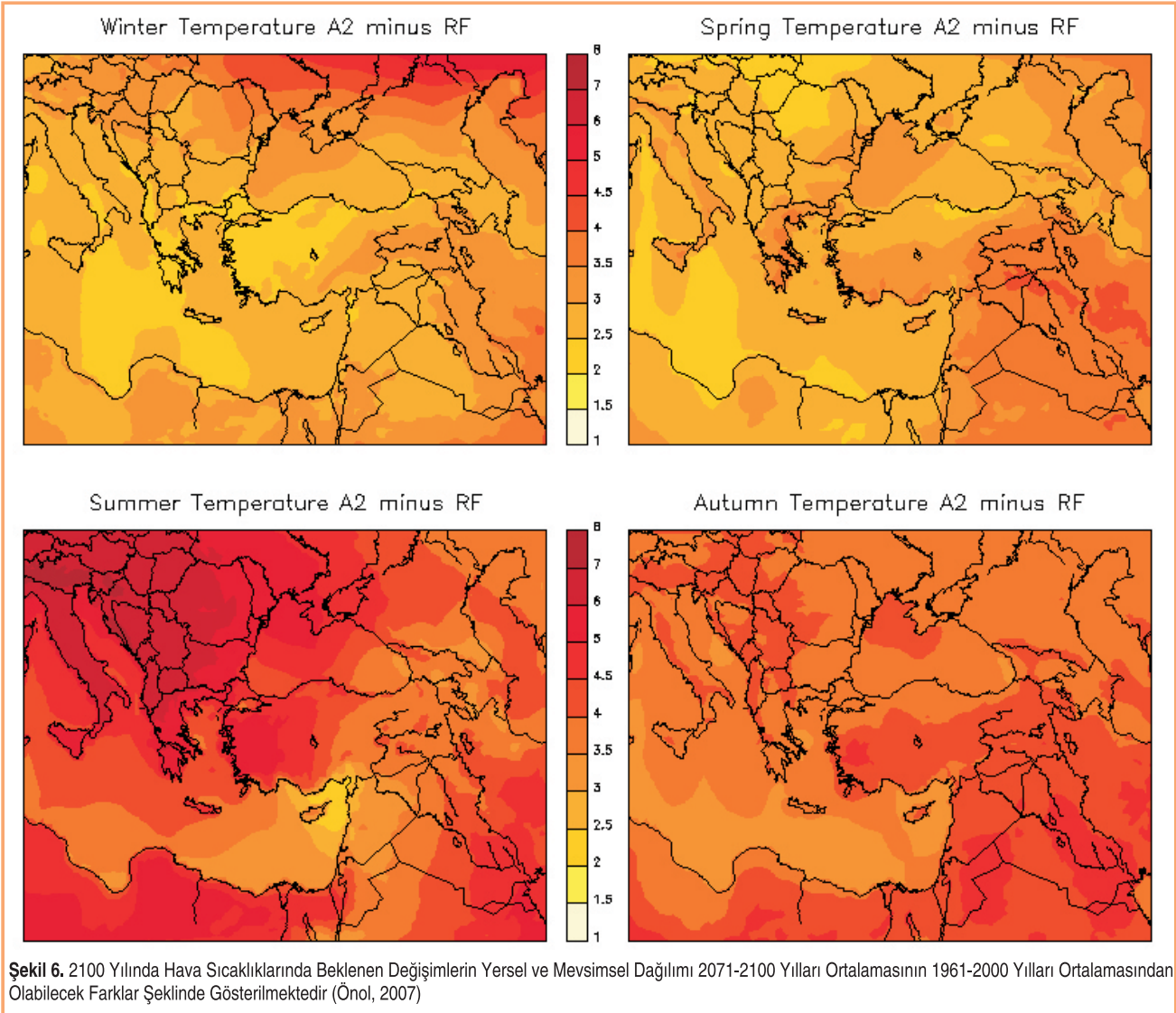
çeşitliliğine, oradan insan sağlığına kadar çok çeşitli alanlarda etkilerinin olacağı aşikârdır. Sıcaklık artışı ayrıca mevsim geçişlerini de etkileyecek, ülkemiz üzerinde yaz mevsimi ilkbahar ve sonbahar aylarını da kapsayacak şekilde genişleyecektir.

Yağış açısından önemli değişiklikler yaşanacak. Özellikle kış aylarında, Türkiye'nin Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu'yu da kapsayan güney bölümünde yüzde 20 ile 50 arasında azalıyor (Şekil 7). Verilere göre, bu bölgelerdeki su havzalarımız ciddi tehlike altında. Karadeniz bölgemiz ise aynı oranda olmasa da önemli ölçüde yağış artışıyla karşı karşıya bulunuyor. Rüzgâr patenlerindeki değişimler güney bölgelerimize nem girişini yavaşlatacak ve yağışın azalmasına sebep olacak. Yine yağıştaki değişimin belirgin olduğu sonbahar mevsiminde ise Güneydoğu ve Doğu Anadolu'nun bir kısmını kapsayan bölgede yüzde 50'yi aşan artışlar beklenmekte. Yukarı ve orta Fırat-Dicle havzasını da kapsayan, ülkemizin su-enerji politikaları için çok önemli olan, bu bölgedeki sonbahar mevsimindeki yağış artışının tek başına değerlendirilmesi yanlış olabilir. Çünkü kış mevsiminden kalan yağış bütçesindeki açık ve gelecekteki sıcaklık artışıyla paralel artacak buharlaşma göz önünde bulundurulduğunda, ortaya pek olumlu bir görüntü çıkmıyor. Adına ister felaket deyin, isterseniz kıyamet...

Hangi senaryoya bakılırsa bakılsın küresel iklim değişikliğinden Türkiye ve gelişmekte olan ülkeler, olumsuz bir şekilde etkilenecektir. Bu olumsuzluklar IPCC'nin projeksiyonlarına göre, ülkemizin de içinde bulunduğu enlemlerde sıcaklıklardaki artışların, yağış rejiminde değişimler, deniz su seviye yükselmesi ve toprak su içeriğinde önemli azalmalar şeklinde olacağı tahmin edilmektedir. Bütün bunların sonucu, 1. Kuraklık (kıtlık, orman yangını, sıcak hava dalgaları, tarımsal hasarlar...), 2. Ani Seller (şiddetli yağmur ve yıldırımlar), 3. Deniz Su Seviye Yükselmeleri (kıyılarda erozyon, dere ve nehirler ile birlikte yeraltı sularının ve alçak arazinin tuzlanması) gibi üç önemli problemin etkilerini gelecekte daha fazla hissedeceğiz.

Türkiye yarı kurak bir ülkedir. Ayrıca kuraklık sosyo-ekonomik etkileri, kalıcılığı ve çözüm bulmadaki zorluk nedeniyle dünyadaki en tehlikeli doğal afet olarak kabul edilmektedir. Kuraklık şehirlerde kullanma suyu kıtlığının yanı sıra, tarımsal ürün ve hidro-elektrik üretiminde de büyük düşüşlere yol açabilir. Bu nedenle, su havzalarının ve tarım alanlarının korunması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca kuraklık, ülke içinde şehir sınırlarını aşan sular ile beraber ülke sınırlarını aşan sularda da büyük sıkıntılara yol açabilecektir.

Ülkemizde kuraklığın şiddetini yakın bir gelecekte bugünkünden çok daha fazla hissedebileceği açıktır. Bu



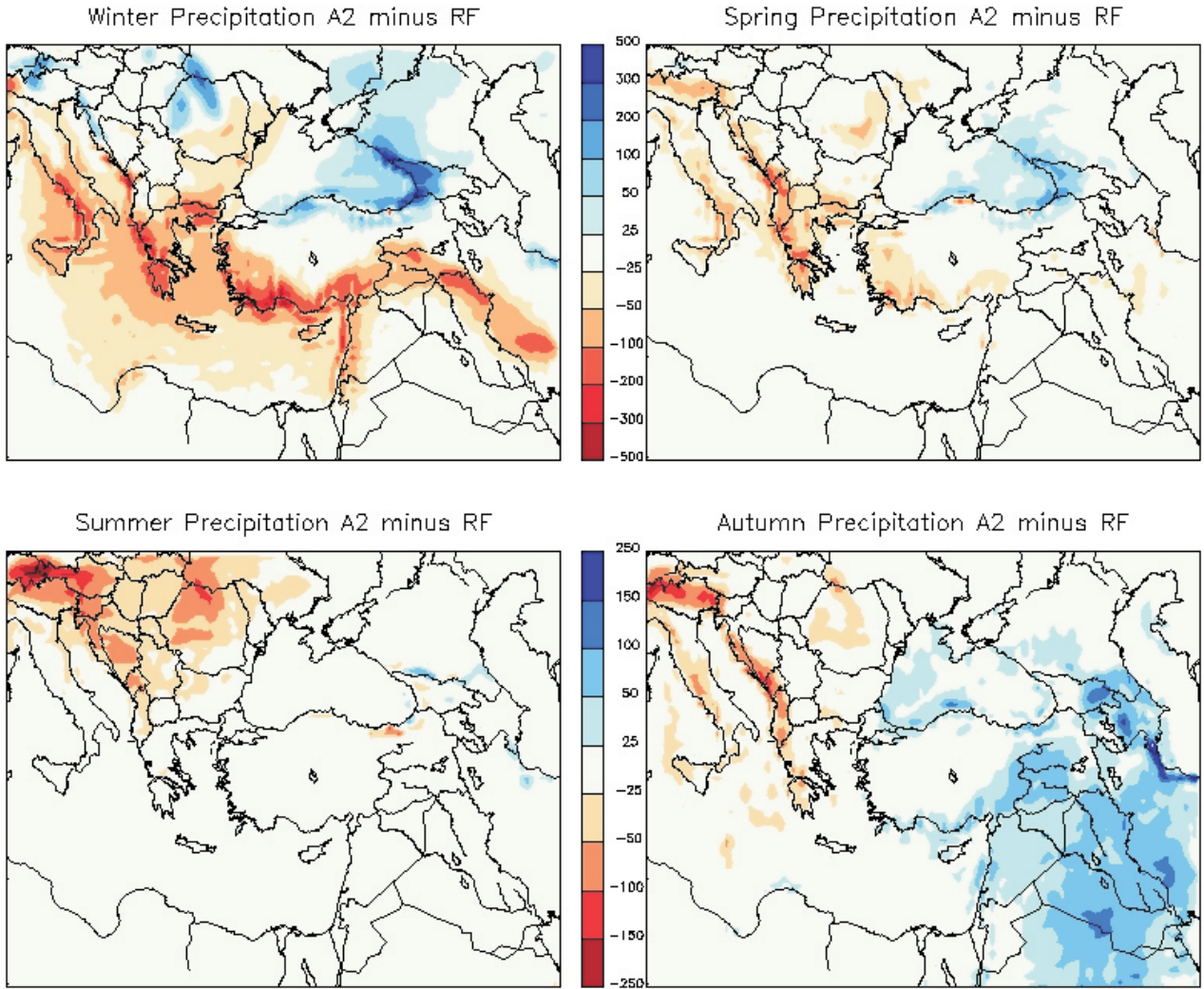
nedenle, suyun artan önemi göz önünde bulundurularak, ilerideki yıllarda, suyun yönetimine, kuraklık planlarına, suyun yeniden kullanımıyla ilgili sistemlerin geliştirilmesi ve sulama tekniklerinin iyileştirilmesi çabaları yoğunluk kazanmalıdır. Akdeniz havzası genelindeki su kaynaklarıyla ilgili bölgesel değişiklikleri belirlemek üzere, bölgesel çalışmalara gereksinim vardır. Bu nedenle, su kaynakları yatırımlarının ve tesislerin planlanması ve işletilmesinde iklim değişiminin söz konusu etkilerinin de göz önünde bulundurulması zorunludur.

Ülkemiz için su, enerji ve tarım açısından da son derece önemlidir. Sulama ve enerji amaçlı ülkemizde çok sayıda su yapısı inşa edilmiş ve edilmektedir. Bu su yapılarının amaçlarına uygun faaliyet gösterebilmesi, ancak yeterli miktarda yağışın düşmesi ile mümkündür. Buharlaştırma, küresel ısınma ile artacak ve ülkemizde daha şiddetli ve uzun süreli kuraklıklar görülecektir. Bu nedenle hem su kaynakları, hem de

genelde yağışa bağlı olan kuru tarım ve hidro-elektrik enerji üretimi ciddi bir şekilde etkilenebilecektir. Ayrıca hidrolojik döngüdeki değişimler, sulama ve su sağlama problemlerinin yanı sıra ani sel olaylarında da artışı beraberinde getirebilecektir.

Özetle, küresel iklim değişiminin ülkemizdeki su kaynaklarına olası kötü etkileri başlıklar halinde şu şekilde özetlenebilir:

- Yağışta yazın büyük azalma olacak fakat buharlaşma artabilecek.
- Yağışların mevsimsel dağılımı ve şiddeti değişecek. Ani sellerde artışlar beklenmekte.
- 1987'den beri zaten ortalamamızın altında gerçekleşen kar örtüsü daha da azalabilecek.
- Akımları sadece miktarı azalmayacak aynı zamanda pik zamanları da değişecektir.
- Kuraklığın sıklığı ve şiddeti artabilecek.



Şekil 7. 2100 Yılında Yağışlarda Beklenen Değişimlerin Yersel ve Mevsimsel Dağılımı 2071-2100 Yılları Ortalamasının 1961-2000 Yılları Ortalamasından Olabilecek Farklar Şeklinde Gösterilmektedir (Önol, 2007).

- “Su stresi” artacak. Şehir ve ülke sınırlarını aşan nehirlerin kullanımı dâhil birçok uluslararası, ulusal ve yerel su kaynağının paylaşımında problemler çıkabilecek.
- Yüksek basınç kuşağının kuzeye kayması ile ülkemizde hâkim olabilecek tropikal iklime benzer bir kuru hava, daha sık, uzun süreli kuraklıklara, orman yangınlarına ve tropikal hastalıklarda artışlara neden olabilecek.
- Kuş cenneti ve benzeri milli parklar tahrip olup, kuşların göç yolları ve konaklama yerleri değişecek.

Sonuç olarak suyun kısıtlı, yağışların bazı bölgeler dışında miktar ve dağılımının düzensiz olduğu, büyük şehirlerde ve tarımsal üretimde suyun kısıtlı bulunduğu, içme, kullanma ve sulama suyu kalitesinin gün geçtikçe artan sanayi ve diğer çevre kirlilikleri neticesinde düştüğü ve küresel ısınma düşünülürse, ülkemizin kuraklığın şiddetini çok yakın bir

zamanda bugünkünden çok daha fazla hissedeceği açıkça görülmektedir.

Diğer bir deyişle, küresel iklim değişimi sonucunda Çevre, Tarım, Orman ve Su Kaynakları gibi pek çok alanın kötü bir şekilde etkilenmesi beklenmekte. Şu an ülkemizde yapılan planlar, kuru tarım yani yağışın doğal miktar ve dağılımına bağlı olarak yapılan tarım yerine, sulu tarım yapılabilecek arazilerin arttırılmasına yönelik. İklimin değişiminden bu projelerin nasıl etkileneceğinin şimdiden belirlenmesi gerekir. Bu nedenle meteorolojik afetlerle gelişmiş ülkelerde olduğu gibi erken uyarı ile mücadele edebilecek şekilde DMİ, DSİ, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Acil Yardım Genel Müdürlüğü, vb.nin mevzuatlarında değişikliklere ve bu kurumlarda köklü reformlara gidilmesi gerekmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Küresel iklim değişimi probleminin çözümüne katkıda bulunmak için onu sadece ekstrem hava olaylarında veya bir korkutucu rapor yayınlanınca hatırlayarak spekülasyonlarda bulunmak yeterli değildir.

Çünkü örneğin, enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörlerin başında hava şartları ve iklim geldiği gibi, iklimi etkileyen önemli faktörlerden biri de enerjidir. İklim değişiminin enerji talepleri üzerindeki potansiyel etkisi, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ve petrol üreticisi olmayan ülkeler için çok önemlidir. Sürdürülebilir enerji politikası temel ilkeleri çerçevesinde, yerli ve yenilenebilir kaynaklarımızın kullanımına öncelik vermeli ve enerjii verimli/tasarruflu kullanmalıyız. Örneğin, ülkemizde yılda 3 milyar dolar değerinde enerji tasarruf potansiyeli mevcuttur ve bunun iki Keban Hidroelektrik Santralinin üretimine eşit olduğu hesaplanmaktadır.

Bu nedenle, ülkemizde kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarının kullanımını minimumda tutmak için enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, su havzalarının, tarım alanlarının ve ormanların sürdürülebilir kalkınma ilke yöntemlerine göre işletilmesi ile birlikte tüm kıyılarımızdaki arazi kullanımının küresel iklim değişiminin etkileri göz önünde bulundurularak planlanması gerekir.

Böylece, "Küresel düşün yerel hareket et" prensibine uygun olarak, küresel iklim değişiminin önlenmesinde enerji tasarrufu yaparak bireysel olarak da katkıda bulunulması gerekiyor. Ülkemizde etkin enerji tasarrufu, vb. politikalar uygulanmazsa gelecekte büyük enerji ve çevre sorunları ile karşı karşıya kalacağımız kesindir. Tüm bu nedenlerden dolayı, ısı yalıtımı da zorunluluktan da öte ülkemizde de büyük bir ihtiyaçtır... Sonuç olarak, "Küresel Düşün, Yerel Hareket Et" felsefesi, ister küçük ister büyük olsun, Türkiye'de de yerel yönetim, belde, belediye ve birey tarafından bir an önce hayata geçirilmelidir...

KAYNAKÇA

1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi <http://unfccc.int/2860.php>
2. **Durmayaz, A., Kadioğlu, M.** 2001. Assessment of the impact of global warming on the residential cooling energy requirement in Adana. ITEC2001 4th International Thermal Energy Congress, İzmir-Turkey, July 8-12, 2001, pp. 51-56.
3. **Gültekin, M.L., M. Kadioğlu.** 2002. İklim Değişiminin yapıların Isıtma İhtiyacı ve Yakıt Tüketimine Etkisi, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 16-18 Ekim 2002, İstanbul, s. 309-318.
4. IPCC, 2001. "Climate change 2001: The Scientific Basis", Intergovernmental Panel on Climate Change, http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm

5. IPCC, 2001. The Global Climate of the 21st Century WG I (Science) Summary for Policy-Makers, Third Assessment Report.
6. **Kadioğlu, M. (Editör),** 2001. Kuraklık Kıranı. Güncel Yayıncılık, İstanbul, 128.s.
7. **Kadioğlu, M., Şaylan, L.** 2001. Trend of Growing Degree-Days in Turkey. Water, Air and Soil Pollution. 126, 83-96.
8. **Kadioğlu, M., Aslan, Z.** 2000. Recent Trends of Growing Season Length in Turkey, 2nd International Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring and Agro-Applications Proceedings, 18-20 October 2000, Tekirdağ/Turkey, pp. 295-303.
9. **Kadioğlu, M.** 1993. Türkiye'de İklim Değişikliği ve Olası Etkileri. Çevre Koruma, 47, 34-37.
10. **Kadioğlu, M.** 1995. Şehirleşmenin İstanbul'da Yağışa Etkisi, II. Hava Kirliliği, Kontrol ve Modelleme Sempozyumu, 22-24 Mart, 1995, İTÜ, İstanbul, s. 72-84. 2 PUAN
11. **Kadioğlu, M.** 1997. Trends in Surface Air Temperature Data Over Turkey. International Journal of Climatology, 17, 511-520.
12. **Kadioğlu, M.** 1997. Trends in Turkish Precipitation Data. The International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries, 17-21 November 1997, Nicosia-North Cyprus, Vol. I, pp. 79-86.
13. **Kadioğlu, M.** 1998. Beykoz-Riva Deresi Örneğiyle İklim Değişikliğinin Kıyılarımız Üzerindeki Olası Etkisi, TÜDAV Beykoz İlçesi Çevre Sorunları Sempozyumu, İstanbul 6-7 Haziran 1998, s. 96-105.
14. **Kadioğlu, M.** 1998. Possible climate changes over Greater Anatolian Project (GAP), Int. Symposium on Water Supply and Treatment 25-26 May, 1998, İstanbul, pp. 65-144.
15. **Kadioğlu, M.** 2000. Regional Variability of Seasonal Precipitation in Turkey. Int. Journal of Climatology, 20, 1743-1760.
16. **Kadioğlu, M.** 2001. Küresel İklim Değişimi ve Türkiye: Bildiğiniz Havaaların Sonu, Güncel Yayıncılık, 3.ü Baskı, İstanbul.
17. **Kadioğlu, M.** 2007. 99 Sayfada Küresel İklim Değişimi Söyleşi Serhan Yedig, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
18. **Kadioğlu, M., Toros, H., Kurtuluş, B.** 1993. Küresel Isınma ve Türkiye'de İklim Değişimi. Türkiye Ulusal Jeodezi-Jeofizik Birliği Genel Kurulu, 8-11 Haziran 1993, Ankara, s. 209-223.
19. **Kadioğlu, M., Şen, Z., Gültekin, L.** 2001. Variations and Trends in Turkish Seasonal Heating and Cooling Degree-days, Climatic Change. 49, 209-223.
20. **Kadioğlu, M., Toros, H.** 1993. Şehirleşmenin Türkiye'de İklim Etkisi. ÇEVRE'93, Türk Devletleri Arasında 2. İlim İşbirliği Konferansı, 26-29 Haziran 1993, Almatı, Kazakistan, pp. 241-246.
21. **Önol, B.** 2007. Downscaling climate change scenarios using regional climate model over Eastern Mediterranean. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2007, p: 87.

Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının Belirlenmesi: Doğu Karadeniz Bölgesi

Ebru ERİŞ¹
Necati AĞIRALIOĞLU²

ÖZ

Yağışın alandaki dağılımının belirlenmesi, hidrolojik uygulamaların ve su kaynaklarının doğru değerlendirilmesi açısından büyük önem taşır. Özellikle dağlık ve/veya kıyı bölgelerde hem orografiyi hem de kıyı etkilerini yağışın dağılımını belirlemede hesaba katmak gerekebilir. Bu gerekliliği, dağlık bölgelerde yağış gözlem istasyonlarının az ve düzensiz olması zorlaştırır. Bu çalışmada da, orografik yağış özelliği gösterdiği bilinen ve sınırlı sayıda yağış gözlem istasyonuna sahip Doğu Karadeniz Bölgesinin kıyı kesimi için yağış dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, Doğu Karadeniz Bölgesinin kıyı kesimine ait yamaçlardaki yağış dağılımının temsilinde su dengesinin, kıyı ve vadilerdeki yağış dağılımının temsilinde ise regresyon denklemlerinin birleştirilerek kullanılması açısından bir ilktir.

Anahtar Kelimeler: Yağış dağılımı, Doğu Karadeniz Bölgesi, eşyağış haritası.

ABSTRACT

Determination of Spatial Distribution of Precipitation on Poorly Gauged Coastal Regions: Eastern Black Sea Region

Determination of spatial distribution of precipitation has an importance in terms of hydrological applications and water resources assessment. Particularly, the effects of orography and coastline on precipitation distribution should be taken into account in mountainous and/or coastal regions. This necessity is complicated by the limited number of rain gauges which have also a nonhomogenous distribution. In this study, it is aimed to determine the spatial distribution of precipitation for the coastal part of the Eastern Black Sea Region. It can be said that this study is the first in terms of combination of precipitation distribution on both hillside and coastal part by using two different approaches. One of these approaches is the water balance that reflects the precipitation distribution on hillside. The other one depends on the regression equations which explains the precipitation variability on coastline and valleys, for the coastal part of the Eastern Black Sea Region.

Keywords: Precipitation distribution, Eastern Black Sea Region, isohyetal map.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 24.11.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ebru.eris@ege.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - necati@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Yağış hidrolojik çevrimin en önemli girdisi olduğundan, alandaki dağılımının belirlenmesi de su kaynaklarının doğru değerlendirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Özellikle yağış gözlem istasyonlarının az olduğu ve homojen olarak dağılmadığı dağlık ve kıyı bölgelerde yağış dağılımının belirlenmesi hayli güçtür. Dağlık bölgelerde çoğu zaman mevcut yağış istasyonları üzerinden kurulan modeller yağışın daha az tahmin edilmesine yol açmaktadır. Kıyı bölgelerde ise denizden gelen nemin ve kıyı topografyasının göz ardı edilmemesi gerekir.

Yağışın alandaki dağılımını belirleyebilmek için kullanılan metotlar, grafik, nümerik ve topografik olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır [1]. Literatürde Thiessen çokgeni gibi teknikleri içeren grafik metotlarla ilgili çalışmalar [2, 3] olduğu gibi, Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi, Lokal Polinom, Radyal Tabanlı Fonksiyon, Kriging vb. yöntemleri içeren nümerik metot çalışmaları da bulunmaktadır [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Topografik metotlar ise, bir bölgedeki nokta ölçümleri ile bu bölgeye ait yükseklik, eğim, bakı, rüzgar yönü ve hızı gibi bir takım coğrafik ve topoğrafik özelliklerin ilişkisini kapsamaktadır [1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

Öte yandan, orografik etkiler gösteren dağlık bölgelerde yağış dağılımının daha doğru belirlenmesi açısından su dengesi gibi farklı yaklaşımlar da uygulanmaktadır [18, 19, 20]. Bu yaklaşımdaki amaç, genellikle düşük yükseklikte ve/veya yerleşim bölgeleri yakınına kurulan ve bu sebeple orografik yağış özelliğini tam olarak yansıtamayan mevcut gözlem istasyonlarının verilerini kullanmak yerine, akım, buharlaşma, sızma gibi diğer hidrolojik çevrim elemanlarından yararlanarak yağışın tahmin edilmesini sağlamaktır.

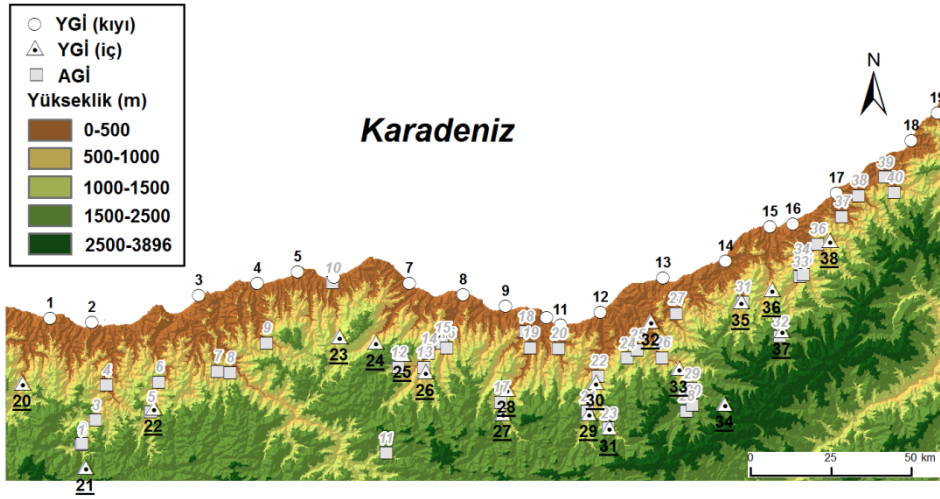
Bu çalışmada da, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin kıyı kesiminde yağış dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle bölgenin yağış dağılımı üzerinde, kıyı şekli ile birlikte enlem, boylam, yükseklik, denizden mesafe gibi coğrafik ve topoğrafik özelliklerin etkisinin incelendiği ve bu etkilerin regresyon analizi yardımıyla denklemlere dönüştürüldüğü Eriş ve Ağırlioğlu [21, 22] çalışmalarından da yararlanılmıştır. Öncelikle; bu çalışmalardan alınan regresyon denklemleri kullanılarak bölgenin eşyağış haritası oluşturulmuştur. Sözü geçen bu eşyağış haritası, Kriging yöntemi ile elde edilen eşyağış haritası ile karşılaştırılmış ve ayrıca haritaların doğruluğu uzun dönem akış katsayıları ile kontrol edilmiştir. Her bir havza için ayrı ayrı bulunan akış katsayıları neticesinde yağış gözlem verileri kullanılarak kurulan modelin ya da Kriging gibi klasik bir yöntemin iyi sonuç vermediği anlaşılacak daha iyi bir yağış dağılım tahmini için su dengesi yaklaşımı uygulanmıştır. Su dengesi metoduyla bulunan dağılımın yamaçları ve yüksek yerleri temsil ettiği, önceden gözlem verileri kullanılarak bulunan regresyon denklemlerinin de kıyı ve vadi kesimi daha iyi temsil ettiği kabul edilerek; bu iki sonuç birleştirilip yeni bir eşyağış haritası hazırlanmıştır. Düzeltilmiş eşyağış haritasının bölgenin yağış dağılımını belirlemede daha iyi bir sonuç verdiği düşünülmektedir.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİ VE VERİLER

Yağış dağılımının belirlenmesinde, çalışma bölgesi olarak Doğu Karadeniz Bölgesinin kıyı kesimi kullanılmıştır. Bölgenin kıyı kesimi; Karadeniz kıyı şeridi ile Doğu Karadeniz dağları arasında kalan bölge olarak tanımlanabilir. Bilindiği üzere Doğu Karadeniz dağları

kıyıya paralel uzanmakta, yer yer 3000 m'yi aşan yüksekliklere ulaşmaktadır. Doğu Karadeniz ılık ve nemli bir iklime sahip olup kışın kar yağışı görülmektedir. Bölgede genellikle yılın her ayında yağış yağmakla birlikte Mayıs-Haziran ile Ekim-Kasım aylarında daha çok, Temmuz ayında en az yağış yağmaktadır. Fakat yüksek yerlerde kışın yağın kar yağışları bahar ve yaz aylarında eridiği için genellikle en çok akış Mayıs ayında, en az akış Şubat ayında meydana gelmektedir. Kıyı bölgesindeki ortalama sıcaklık 14-15 °C ve ortalama yağış ise 1000 mm'den fazladır. Bölgedeki hakim rüzgar yönü rüzgar gülünün kuzey-batı diliminde oluşmaktadır [23, 24].

Çalışmada 38 Yağış Gözlem İstasyonuna (YGİ) ait ortalama yıllık yağış verisi, 40 Akım Gözlem İstasyonuna (AGİ) ait ortalama yıllık akım verisi kullanılmıştır. YGİ ve AGİler ile ilgili bilgiler ve konumları Tablo 1, 2 ve Şekil 1'de görülmektedir. İstasyonlar yorum kolaylığı açısından batıdan doğuya doğru numaralandırılmıştır. YGİ yükseklikleri 6 m ile 1700 m arasında değişmekte olup 1700 m'den sonra yağış istasyonu bulunmamaktadır. AGİ yükseklikleri ise 17 m ile 1450 m arasında değişmekte olup AGİ drenaj alanı büyüklükleri yaklaşık 66 km² ve 835 km² arasındadır. Evapotranspirasyon hesabı için bölgedeki 23 istasyonunun (Tablo 1) sıcaklık, rüzgar hızı, nem, güneşlenme süresi, radyasyon vb. meteorolojik verileri kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma bölgesi ve yağış istasyonları

Çalışmada kullanılan yağış verileri 1960-2005 yıllarını, akım verileri ise 1944-2006 yıllarını kapsamakla beraber eksik veriler de mevcuttur. Eksik verileri tamamlamak için komşu istasyonlardan yararlanarak regresyon denklemleri kurulmuştur. Yağış ve akım verilerinin homojenliği çift toplam eğrisi metodu ve trendi ise Mann-Kendall trend testi ile belirlenmiştir. Homojen olmayan ya da trend gösteren istasyonlarda, veri homojenleştirildikten ve trend çıkarıldıktan sonraki değerler; gözlenen orijinal değerlerden en fazla % 27 oranında farklı çıktığı için tüm istasyonlarda gözlem değerleri doğrudan kullanılmıştır.

Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının ...

Tablo 1. Çalışmada kullanılan YGİ
(*evapotranspirasyon hesabında verileri kullanılan istasyonlar)

Yağış Gözlem İstasyonları						
Sıra No	YGİ No	YGİ Adı	X	Y	Yükseklik (m)	Gözlem Periyodu
1	1453	Bulancak*	435457	4531639	10	1973-1997
2	17034	Giresun*	448474	4530365	38	1960-2005
3	1460	Tirebolu*	481778	4538780	70	1975-2000
4	1299	Görece	500000	4542457	20	1960-1999
5	1300	Eynesil*	512603	4546169	10	1963-1993
6	1302	Vakıfkebir*	523811	4544346	25	1960-2005
7	17626	Akçaabat*	547167	4542486	6	1960-2005
8	17037	Trabzon	564012	4538882	30	1975-2005
9	1471	Arsin*	577132	4535461	10	1963-1995
10	1472	Araklı*	589799	4531904	10	1963-1996
11	1473	Sürmene	594327	4529502	12	1960-1981
12	1475	Of*	606655	4533597	9	1960-1989
13	17040	Rize*	626172	4544221	9	1960-2005
14	1312	Çayeli	645595	4549455	10	1960-1986
15	17628	Pazar*	659298	4560169	79	1975-2005
16	1156	Ardeşen*	666343	4561005	10	1965-1992
17	1015	Fındıklı*	680093	4570589	100	1960-2000
18	17042	Hopa*	703345	4586759	33	1975-2005
19	818	Kemalpaşa	711502	4595512	75	1984-1999
20	22-018	Sofulu	426837	4511367	600	1980-2005
21	22-001	Tamdere	446348	4485297	1700	1960-2005
22	22-020	Sinir	467607	4503676	750	1984-2005
23	1623	Tonya*	525275	4525849	900	1963-1995
24	1624	Düzköy*	536517	4524046	850	1960-2003
25	22-017	Güzelyayla	544967	4520393	1250	1979-2005
26	1626	Maçka*	552032	4514888	300	1960-1997
27	22-011	Kayaıçi	576055	4502037	1050	1977-2002
28	1787	Dağbasi*	577403	4509559	1450	1968-1998
29	22-016	Kökner	602839	4502007	1218	1980-1997
30	1801	Çaykara*	604880	4511576	264	1960-1998
31	1962	Uzungöl*	609071	4497483	1110	1969-2005
32	1476	Kalkandere*	622103	4530518	400	1975-1996
33	1803	İkizdere*	630786	4515861	800	1975-1996
34	22-003	Sivrikaya	645053	4504915	1650	1974-1995
35	1480	Kaptanpaşa*	650060	4536588	525	1975-1996
36	22-009	Hemşin	659797	4540496	500	1963-1974
37	22-013	Meydan	662887	4527605	1100	1979-2002
38	22-019	Tunca	677661	4555718	500	1983-2005

Tablo 2. Çalışmada kullanılan AĞİler

Akım Gözlem İstasyonları								
Sıra No	AĞİ No	AĞİ Adı	Akarsu	X	Y	Drenaj alanı (km ²)	Yükseklik (m)	Gözlem Periyodu
1	2236	İkisu	Aksu	445223	4492244	317.2	1037	1965-1974
2	22071	İkisu	Aksu	445532	4492765	292.7	1050	1986-1999
3	22090	Alancık	Aksu	449695	4500044	470.2	750	1986-2004
4	2213	Dereli	Aksu	453193	4510906	713.0	248	1962-2004
5	22080	Sınırköy	Yağlı	466875	4502569	296.9	750	1983-2005
6	22073	Tuğlacık	Yağlı	469448	4511808	397.9	400	1986-2006
7	22087	Hasanşeyh	Gelevera	487532	4515178	256.8	355	1984-2006
8	22013	Süttası	Kavraz	491562	4514710	124.9	188	1970-2004
9	22058	CücenKöprü	Görelle	502809	4523957	162.7	300	1980-2006
10	2228	Bahadırlı	Fol	523443	4542680	191.4	17	1963-2002
11	22084	İkisu	Korum - Yağlı	540191	4489746	149.6	1450	1984-1999
12	22088	Ormanüstü	Maçka	543960	4516409	150	770	1985-1999
13	22061	Ortaköy	Altın	551927	4516460	261	450	1980-2002
14	2206	Kanlıpelit	Değirmendere	553256	4520756	708	257	1951-1989
15	22086	Öğütlü	Değirmendere	557517	4523964	728.4	160	1984-2004
16	22059	Çiftdere	Galyan	558911	4522341	121.5	250	1980-2005
17	22044	Aytaş	Kara	575591	4505532	421.2	510	1979-2005
18	22034	Fındıklı	Yanbolu	583441	4527512	258.6	258.6	1970-2004
19	2202	Ağnas	Kara	584879	4522532	635.7	78	1944-2002
20	22053	Ortakoy	Sürmene	593617	4522268	173.6	150	1979-2006
21	22057	Alçakköprü	Ögene	602599	4502760	243	700	1979-2005
22	22052	Ulucami	Solaklı	606083	4513714	576.8	260	1979-2005
23	22007	Şerah	Haldizen	609060	4497459	154.7	1170	1966-2001
24	22068	Yenikoy	Baltacı	615095	4519240	171.6	470	1982-2004
25	22066	Cevizlik	Maki	618217	4521849	115.9	400	1982-2001
26	2218	Şimşirli	İyidere	625873	4519354	834.9	308	1963-2004
27	22082	Kömürcüler	Salarha	630293	4533126	83.3	250	1984-2002
28	2233	Tosköy	Tosköy	633458	4502861	223.1	1296	1965-2002
29	2215	Dereköy	Çamlıdere	634927	4509890	445.2	942	1965-2002
30	22078	Tosköy	Tosköy	635353	4504561	284.3	1000	1986-2001
31	22085	Kaptanpaşa	Şenöz	651039	4536732	231.2	400	1984-2006
32	22074	Çat	Hemşin	662384	4525990	277.6	1100	1982-1999
33	22062	Konaklar	Hemşin	668797	4544554	496.7	300	1980-2005
34	2232	Topluca	Fırtına	669079	4548541	762.3	233	1964-2002
35	22063	Mikronköprü	Halo	669784	4545317	239.2	325	1980-2004
36	22076	Kemerköprü	Durak	674187	4554678	302.2	230	1984-1997
37	22072	Arılı	Arılı	681674	4563223	92.15	175	1982-2005
38	22006	Köprübaşı	Abuçağlayan	686891	4569712	156	60	1966-1999
39	22049	Başköy	Kapistre	695072	4575544	186.2	75	1978-2006
40	22089	Küçükköy	Ballı	698017	4570809	66.37	400	1985-2006

3. EŞYAĞIŞ HARİTALARI

3.1. Yöntem

Eşyağış haritalarının hazırlanmasında Ordinary Kriging yöntemi ve Regresyon Analizi (RA) yardımıyla çıkarılan denklemlerden yararlanılmıştır.

Kriging, Denklem 1’de görülen ağırlıkların (λ_i), tahmin hatalarının ortalamasının sıfır ve varyansı en küçük olacak şekilde belirlenmesidir. Kriging matris formunda Denklem 2’deki gibi gösterilebilir. Matriste görülen γ değerleri noktalar arasında uzaklığa ilişkin yarıvaryogram değerlerini, μ ise Lagrange sabitini göstermektedir. Yarıvaryogram ise Denklem 3 formülüyle hesaplanır.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2N} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \cdot & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{01} \\ \gamma_{02} \\ \cdot \\ \gamma_{0N} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N (Z(x+h) - Z(x))^2 \quad (3)$$

Burada $Z(x)$ ve $Z(x+h)$; x ve $x+h$ noktalarındaki yağış değerlerini, $N(h)$ birbirinden h kadar uzaklıktaki tüm veri çiftlerinin sayısını göstermektedir. Herhangi bir bölgede enterpolasyon için Kriging kullanılacaksa, çalışma bölgesindeki verilerden yararlanarak deneysel varyogram Denklem 3’e göre hesaplanır. Böylece, deneysel varyogram yardımıyla teorik modele ait parametreler belirlenebilir. Kriging yöntemiyle belirlenen ağırlıklar seçilen teorik varyogram fonksiyonuyla doğrudan ilişkilidir. Geoistatistikte sıkça kullanılan fonksiyonlar, gauss, üssel, küresel, logaritmik ve liner modellerdir.

3.2. Uygulama

Eşyağış haritaları Kriging ve regresyon olmak üzere iki farklı yöntemle hazırlanmıştır. Yağışın dağılımının belirlenmesinde kullanılan Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (Inverse Distance Weighted-IDW), Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function-RBF) gibi yöntemler bu çalışmada kullanılmışsa da; söz konusu yöntemlerin orografik özellik gösteren bölgelerde yetersiz kalması nedeniyle [25, 26] bulunan sonuçlara burada değinilmemiştir.

Haritaların hazırlanmasında daha önce Eriş ve Ağırlioğlu [21, 22] çalışmalarında, bölgedeki yağış dağılımı için bulunan regresyon denklemleri kullanılmıştır. Bahsi geçen bu regresyon denklemleri bölgedeki yağış ile coğrafik/topografik değişkenlerin ilişkisinden

yararlanılarak çıkarılmıştır. Bu denklemler, ayrıca kıyı şeklinin yağış üzerindeki etkisini temsil eden ve yeni bir değişken olarak sunulan kıyı açısını da içermektedir. Bu çalışmada regresyon analizinin ayrıntılarına girilmeyecek olup çıkarılan denklemler Denklem 4a ve 4b’de kıyı ve iç istasyonlar için ayrı ayrı verilmiştir.

$$P = \beta_o + \beta_1 A \quad (4a)$$

$$P = \beta_o + \beta_1 Y + \beta_2 A \quad (4b)$$

Bu bağıntılarda; P ; yağış yüksekliğini, Y ; enlem, A ise kıyı açısını göstermektedir. β ’lar ise regresyon katsayılarıdır.

İki farklı yöntemle çıkarılmış eşyağış haritaları Şekil 2’de verilmiştir. Yöntemler hem çapraz doğrulama (kalibrasyon) hem de basit doğrulama (validasyon) ile kontrol edilmiştir. Çapraz doğrulamada söz konusu yöntem içerisinde yer alan ölçüm noktalarındaki değerler; çevresindeki değerlerle tahmin edilmiş ve daha sonra gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar Ortalama Hatanın Karesinin Karekökü (OHKK) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH) istatistiklerine göre değerlendirilmiştir. Basit doğrulamada ise rastgele seçilen 6 YGİ için modellerin validasyonu yapılmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Eşyağış haritalarının elde edilmesinde kullanılan yöntemlere ait kalibrasyon ve validasyon sonuçları

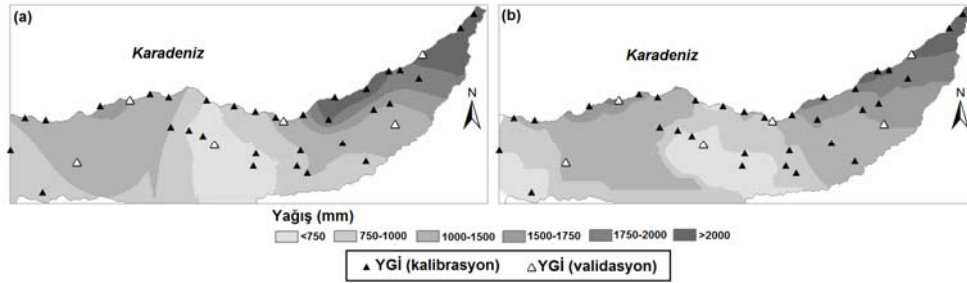
Kalibrasyon				Validasyon			
İstasyon Türü	İstatistik	Kriging	Regresyon	İstasyon Adı	Ölçüm	Tahmin (Kriging)	Tahmin (Regresyon)
Kıyı istasyonlar (16 adet)	R^2	0.924	0.839	Görece (4)	1595.4	1511.1	1899.4
	OHKK	167.27	227.02	Sürmene (11)	1181.4	1171.3	1045.8
	OMH	118.02	198.43	Fındıklı (17)	2217.4	2075.2	2067.9
İç istasyonlar (16 adet)	R^2	0.833	0.993	Sınır (22)	993.2	1127.7	1165.0
	OHKK	178.41	42.29	Maçka (26)	684.1	702.6	632.2
	OMH	144.63	20.96	Meydan (37)	1185.4	1283.2	1528.7

İki farklı yöntemden çıkarılan haritalar birbirine benzemekte, determinasyon katsayıları ve validasyon sonuçları oldukça tatminkar gözükmektedir. Ancak bölgenin dağlık olduğu ve YGİ noktalarının çok olmaması ya da homojen dağılmaması nedeniyle çıkarılan eşyağış haritalarının ayrıca kontrol edilmesi gerekli görülmüştür. Haritaların doğruluğunu tespit etmek için yıllık akış katsayıları hesaplanmıştır. Buna göre ortalama yıllık akım verisi bulunan 40 AĞİ’ye ait drenaj havzaları için ortalama alan yağış değerleri çıkarılmış ve akış katsayısı hesabında kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 3’te görülmektedir.

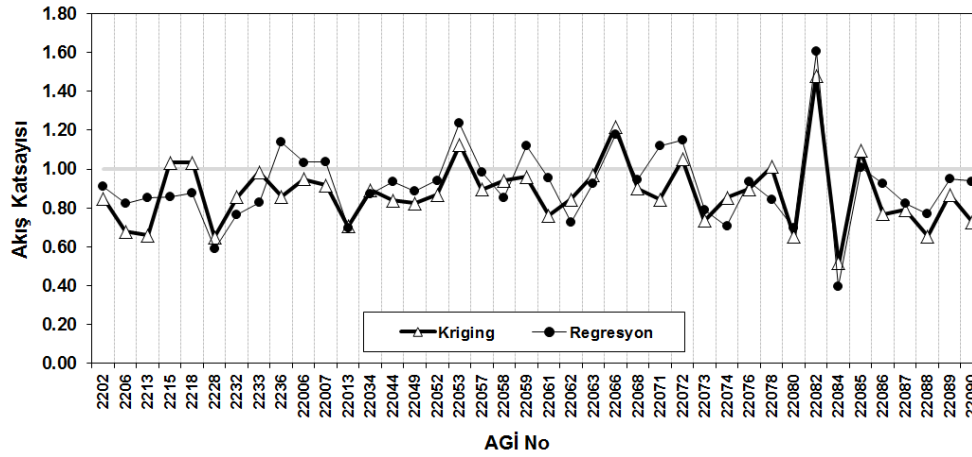
Şekil 3’ten görüldüğü üzere, farklı yöntemlere göre bulunan eşyağış haritalarından çıkarılan ortalama alan yağışlarına göre bulunan akış katsayılarından önemli bir kısmı 1’den büyük ya da 1’e çok yakındır ki bu durum teorik olarak anlamsız görünmektedir. Aylık bazda kar

Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının ...

erimesi ya da yer altı suyu beslenmesinden dolayı 1'den büyük çıkabilecek akış katsayılarının yıllık bazda 1'den büyük çıkması mümkün olmamaktadır. Bu durum akış katsayısı hesabında kullanılan ortalama alan yağışlarının doğru olmadığını düşündürmektedir. Bir başka deyişle YGİler, konumları nedeniyle orografik yağış etkilerini temsil edememektedir. Çalışma bölgesi için doğru bir yağış dağılımı tespiti doğrudan mevcut YGİler üzerinden kurulan modellerle mümkün olmayacağından, farklı bir yaklaşım olarak su dengesinden yararlanarak yağış dağılımının belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu yaklaşımla ortalama yıllık akım ile gerçek evapotranspirasyon haritaları çıkarılmış ve beraberinde değerlendirilerek yağış dağılımına ulaşılmıştır. Bölge özellikleri ve zaman ölçeği (yıllık) göz önüne alınarak akiferdeki net debi değişimi ihmal edilmiştir.



Şekil 2. Eşyağış haritaları (a) Kriging ve (b) Regresyon



Şekil 3. AGİ havzalarına ait yıllık akış katsayıları

4. SU DENGESİ YAKLAŞIMI

4.1. Yöntem

Yağış dağılımının belirlenmesinde su dengesi yöntemi uygulanmıştır (Denklem 5).

$$\bar{P} = \bar{Q} + \bar{ET} + G \quad (5)$$

Burada, \bar{P} , \bar{Q} , \bar{ET} sırasıyla uzun dönem ortalama yıllık yağış, akım ve evapotranspirasyonu göstermektedir. G ise akiferdeki (sistemi besleyen veya beslenen) net debi değişimini ifade eder. Mevsim ve su tablası seviyelerine göre net debi değişimi (G) pozitif veya negatif olabilir. Ancak uzun yıllar ortalaması alındığında bu değişimin etkisi ihmal edilebilmektedir [19]. Özellikle akifer alanları ihmal edilecek kadar küçük olan Doğu Karadeniz Bölgesindeki [27] söz konusu değişim, topografyasının aşırı derecede eğimli ve jeolojik yapısının genelde volkanik kayalar niteliğinde olmasına [28] bağlı olarak su bütçesi çalışmasında ihmal edilmiştir.

Akımın alan üzerinde enterpolasyonunda Huang ve Yang [29] çalışmasından yararlanılmıştır. Buna göre ortalama yıllık akım, akım yüksekliğine dönüştürülerek havza ağırlık merkezine yerleştirilmiş, daha sonra Kriging yöntemi yardımıyla alandaki dağılımı bulunmuştur. Akım yüksekliği, yağış gibi bir noktayı temsil etmekten ziyade üzerinde kalan alanı temsil ettiğinden dolayı ağırlık merkezine yerleştirilmiştir.

Öte yandan, evapotranspirasyonun alandaki dağılımını belirlemek için öncelikle gerçek (muhtemel) evapotranspirasyon değerleri, Turc [30]-Pike [31] formülüne göre hesaplanmıştır. Turc-Pike gerçek evapotranspirasyon modeli aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\frac{MET}{PET} = \frac{(P/PET)}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{PET}\right)^2}} \quad (6)$$

Burada, MET , PET ve P sırasıyla gerçek (muhtemel) ve potansiyel evapotranspirasyon, ortalama yıllık yağıştır. Modelde bulunan potansiyel evapotranspirasyon FAO-56 Penman-Monteith [32] denklemi ile bulunmuştur (Denklem 7).

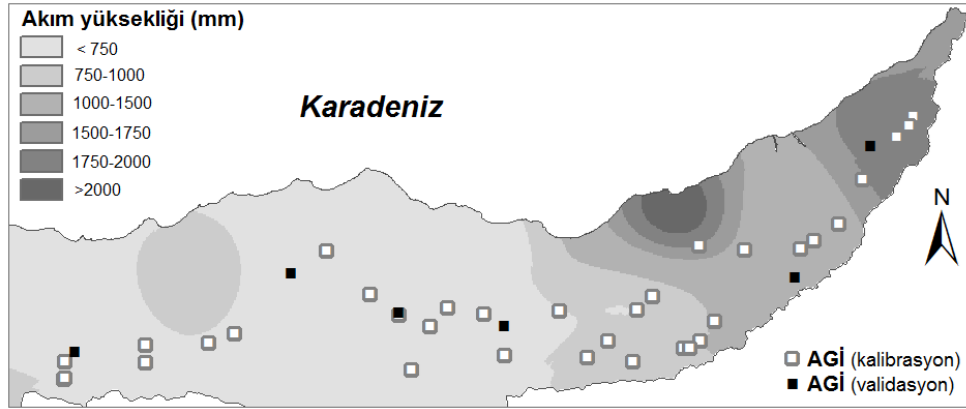
$$ET_0 = \left[\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] \quad (7)$$

Burada; ET_0 : Referans evapotranspirasyon (mm/gün), R_n : bitki yüzeyindeki net radyasyon (MJ/m^2 gün), G : zemin ısı değişim yoğunluğu (MJ/m^2 gün), T : 2 m yükseklikte günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}C$), u_2 : 2 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı (m/s), e_s : doymuş buhar basıncı (kPa), e_a : mevcut buhar basıncı (kPa), $e_s - e_a$: doymuş buhar basıncı açığı

(kPa), Δ = buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa / °C) ve γ : psikrometrik sabit (kPa / °C) değerlerini göstermektedir.

4.2. Uygulama

Akım yüksekliği haritasının belirlenmesinde, 40 adet AGİ'ye ait akım yüksekliği, yine bu havzalara ait ağırlık merkezlerine yerleştirilmiştir. Modelin validasyonu için rastgele 6 AGİ seçilmiştir. Huang ve Yang [25] çalışmasından yararlanılarak Ordinary Kriging yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan yöntemle göre çıkarılan akım yüksekliği haritası Şekil 4'te ve validasyon aşamasına ait sonuçlar ise Tablo 4'te verilmiştir.

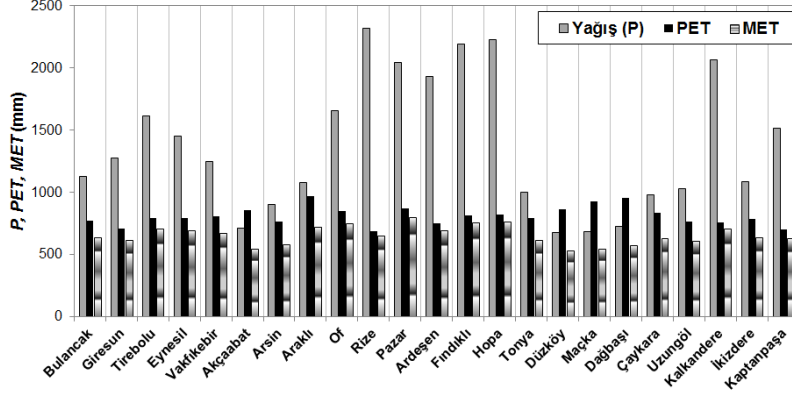


Şekil 4. Akım yüksekliği haritası

Tablo 4. Akım yüksekliği için validasyon sonuçları

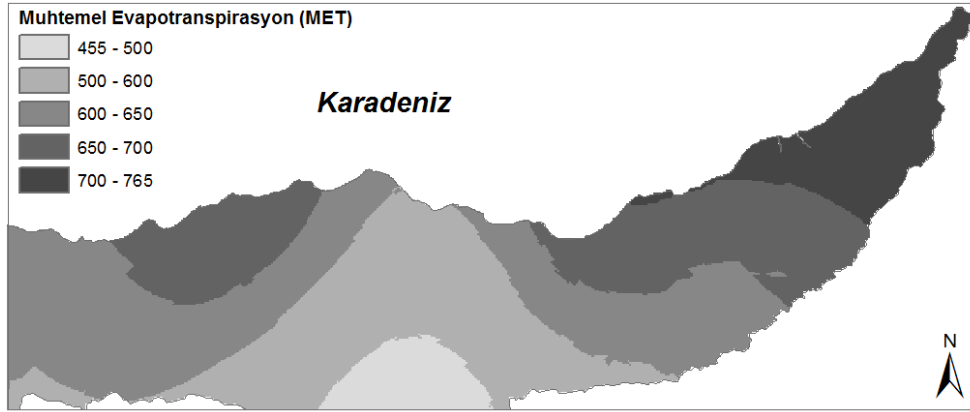
AGİ No	Ölçüm debisi (m ³ /s)	Tahmini akım yüksekliği (mm)	Tahmin debisi (m ³ /s)
2202	12.20	702.57	14.16
2213	13.80	640.43	14.48
22058	5.68	651.27	3.36
22072	6.32	1722.26	5.03
22074	8.79	965.31	8.50
22086	12.85	504.50	11.65

Evapotranspirasyon haritası için bölgede büyük ve küçük klima istasyonlarına ait minimum, maksimum sıcaklıklar, ortalama rüzgar hızı, ortalama nem, güneşlenme süresi, global güneş radyasyonu Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilerek potansiyel ve muhtemel evapotranspirasyon değerleri sırasıyla FAO-56 Penman-Monteith ve Turc-Pike formülüyle hesaplanmıştır, bulunan değerler Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon (PET), muhtemel evapotranspirasyon (MET) ve ölçülen yağış değerleri

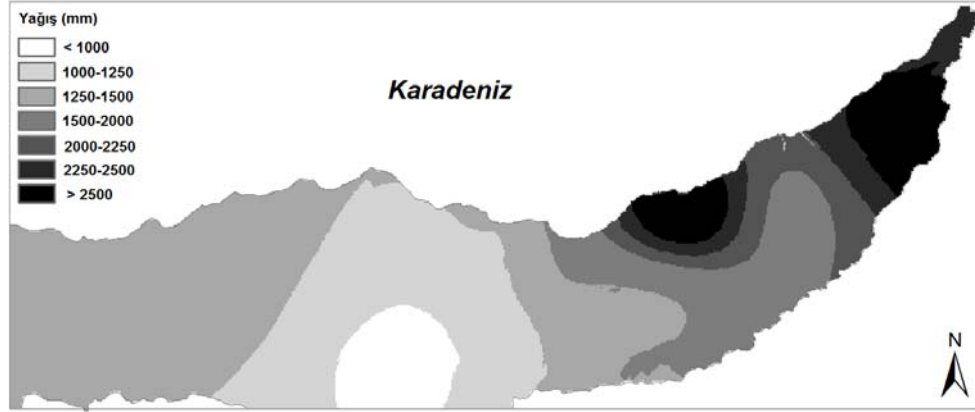
Kriging yöntemi bir kez daha kullanılarak evapotranspirasyon haritası elde edilmiştir. Veri sayısı çok olmadığından validasyon aşaması için veri ayrılmamıştır. Çapraz doğrulama sonuçları ile yetinilmiştir. Turc-Pike formülüne göre hesaplanan muhtemel evapotranspirasyon haritası ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Muhtemel Evapotranspirasyon (MET) haritası

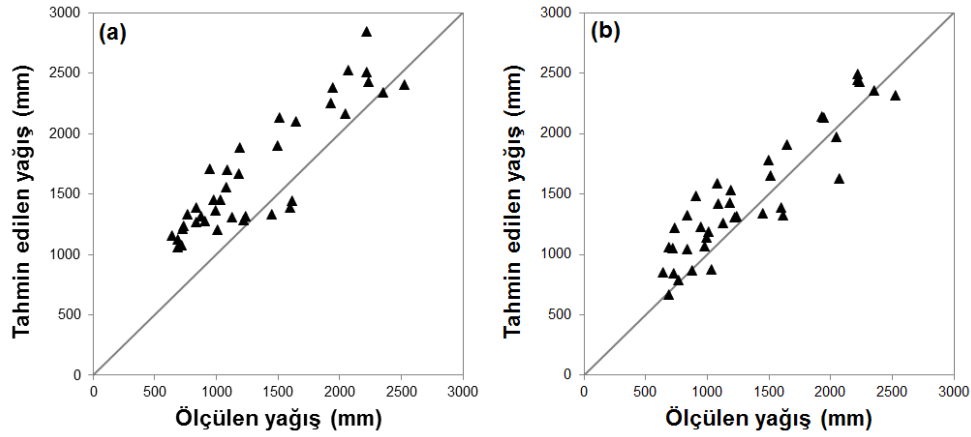
Elde edilen akım yüksekliği ve evapotranspirasyon haritaları beraber değerlendirilerek Şekil 7'de görülen yağış haritası elde edilmiştir. Anlaşılacağı üzere bu eşyağış haritasının elde edilmesinde herhangi bir YGİ kullanılmamış olup yalnızca su dengesinden yararlanılmıştır. Yüksek kısımlarda ve/veya yamaçlarda herhangi bir YGİ bulunmadığından çıkarılan eşyağış haritası öncelikle mevcut YGİlerle kontrol edilmiştir. Mevcut YGİlerden elde edilen yıllık ortalama yağış değerleri ile eşyağış haritasından çıkarılan yağış değerlerine ait karşılaştırma Şekil 8(a)'da görülmektedir.

Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının ...



Şekil 7. Akım yüksekliği ve evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritası

Şekil 8 (a)'dan görüleceği üzere, mevcut YGİler için genel olarak daha büyük tahmin değerleri bulunmuştur. Akım yüksekliği- evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritasının daha büyük yağış miktarı verdiği yerler özellikle iç kesimlerdir. Bu durum iç kesimlerin daha az yağış aldığına dair fikri güçlendirmektedir. İç kesimlerin daha az yağış alması yazarların önceki çalışmalarında da [21, 22] işaret ettiği üzere kıyı şeklinin bir sonucudur. Doğu Karadeniz kıyısı doğu-batı yönlü olup kıyı şeridi burun ve koylara sahiptir. Bu topoğrafya nemi taşıyan ve hakim rüzgar yönü olan kuzeyli ve batılı rüzgarlar için doğal bir engel oluşturmaktadır.



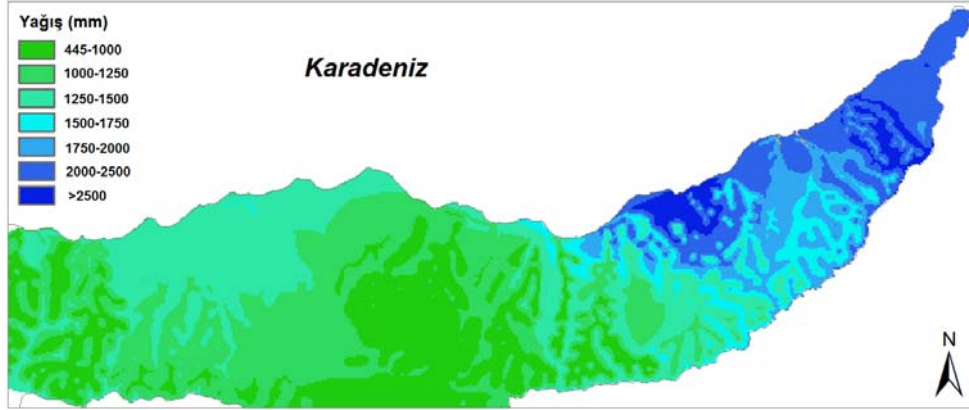
Şekil 8. Ölçüm-tahmin saçılma diyagramı (a) eşyağış haritası; (b) düzeltilmiş eşyağış haritası

Yukarıdaki sebepler göz önüne alınarak bölgenin yağış dağılımının yeniden belirlenebilmesi için vadi içleri ve kıyı kesimi daha iyi temsil ettiği düşünülen, kıyı açısı

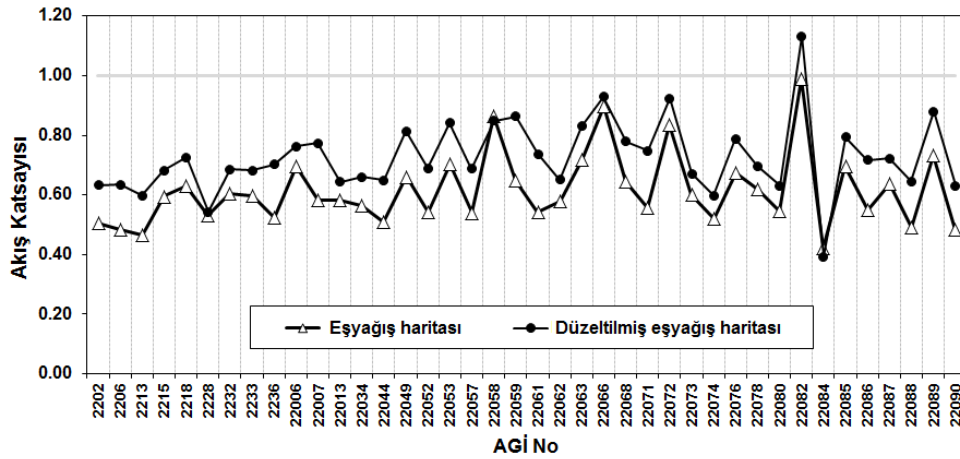
değişkenini içeren regresyon denklemleri, akım yüksekliği-evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritası ile birleştirilmiş ve “düzeltilmiş eşyağış haritası” olarak adlandırılmıştır. Birleştirme işlemi uygun bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı ile yapılmıştır. Kıyı kesimi için Denklem 4(a); vadi içleri için ise Denklem 4 (b) kullanılmıştır. Kıyı kesimi boyunca seçilen noktalarda kıyı açıları bulunarak Denklem 4(a) uygulanmıştır. Öte yandan, bölgedeki akarsular denize dik konumlandıkları için her bir akarsu üzerinde/yakınında rastgele noktalar seçilerek Denklem 4(b) uygulanmıştır. Söz konusu noktalar ile kıyı kesimindeki noktalar (regresyon denklemlerinin uygulandığı noktalar) dışında kalan alanda ise akım yüksekliği-evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritasının geçerli olduğu varsayılarak birleştirme işlemi yapılmıştır. Böylece kıyı ve vadi içleri regresyon denklemleri ile yamaçlar ve yüksek kısımlar ise su dengesi yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Bir başka deyişle kıyı topoğrafyasının yağış dağılımı üzerindeki etkisinin yalnızca kıyıda değil yüksek dağ sıraları arasında kalan vadi içlerinde de temsili sağlanmıştır.

Düzeltilmiş eşyağış haritası; akım yüksekliği-evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritasının, regresyon denklemleri ile birleştirilerek düzeltilmiş halidir. Mevcut YGİlerin yıllık ortalama yağış değerleri ile düzeltilmiş eşyağış haritasından çıkarılan yağış değerlerine ait çapraz doğrulama Şekil 8(b)'de verilmiştir. Şekil 8(b), vadi içleri ve kıyıların daha iyi temsil edildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş eşyağış haritası Şekil 9'da görülmektedir. Her bir AĞİ drenaj havzası için çıkarılan yıllık akış katsayıları düzeltilmiş eşyağış haritası kullanılarak yeniden hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Düzeltilmiş eşyağış haritasına göre bulunan akış katsayılarının bölge ağırlıklı ortalaması yaklaşık 0.70 olarak bulunmuştur.

Bölüm 3'te Kriging ve Regresyon yöntemlerinden çıkarılmış haritalar kullanılarak bulunan akış katsayılarına göre düzeltilmiş eşyağış haritasından hesaplanan ortalama alan yağış değerleri kullanılarak bulunan akış katsayılarının bir tanesi hariç hepsi 1'den küçüktür. Akım yüksekliği-evapotranspirasyon haritalarından elde edilen eşyağış haritası kullanılarak bulunan akış katsayıları, düzeltilmiş eşyağış haritası kullanılarak bulunan akış katsayılarına göre daha küçüktür. Vadi içlerinde daha az yağış ölçüldüğü ve modelleme buna göre düzeltildiği için, ortalama alan yağışı da daha düşük bir değerde çıkmış ve dolayısıyla akış katsayılarının değeri, düzeltilmemiş eşyağış haritasından bulunan yağışlara göre hesaplanan akış katsayılarına nazaran yükselmiştir. Akış katsayısı 1'den büyük olan tek havza yaklaşık 83 km² lik alana sahip Kömürcüler (22082) istasyonuna aittir. Bu istasyonun drenaj havzasına ait akış katsayıları her model için (Kriging, Regresyon, Akım yüksekliği- evapotranspirasyon haritalarından elde edilen düzeltilmemiş eşyağış haritası ile düzeltilmiş eşyağış haritası) en büyük değeri vermiştir. Bu havzaya ait akış katsayısının büyük çıkmasının; bölgedeki en küçük drenaj alanına sahip olması ve yağış dağılımına ait yüzey haritası oluşturulurken havza çevresinde kendisine en yakın 2000 mm.'nin üstünde yağış alan Kalkandere (32) YGİsi ile bu YGİ etrafında konumlanmış daha az yağış alan (974-1646 mm) diğer YGİler arasında kurulan enterpolasyonun neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Düzeltmiş eşyağış haritası



Şekil 10. AGİ havzalarına ait ve düzeltilmiş eşyağış haritası kullanılarak bulunan yıllık akış katsayıları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi kıyı kısmı için yağışın alandaki dağılımının belirlenmesine çalışılmıştır. Çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Özellikle dağlık bölgelerde mevcut YGİler, konumları nedeniyle bölgedeki yağış dağılımını temsil etmekte yetersiz kalmaktadırlar. Mevcut YGİlerle kurulan modeller yağışı çoğu zaman olduğundan daha az tahmin etmektedirler. Nitekim bu sonuç Bozkurt vd. [33] çalışmasıyla da doğrulanmaktadır. Söz konusu çalışmada kurulan iklim modeli sonuçları ile nokta ölçümleri arasındaki farkın; yüksek kısımlarda

gözlem istasyonunun bulunmamasından kaynaklandığı ve mevcut YGİlerle yağış dağılımının belirlenmesinin iyi sonuç vermeyeceği belirtilmektedir.

- Günümüzde yağış dağılımının belirlenmesinde sıkça kullanılan Kriging vb. jeostatistiksel yöntemlerin doğruluğu özellikle karmaşık topoğrafyaya ve/veya yetersiz sayıda gözlem istasyonuna sahip bölgeler için akış katsayısı vb. bir yöntemle kontrol edilmelidir.
- Yüksek kesimlerde ve/veya yamaçlarda YGİ mevcut değilse su dengesi yaklaşımı ile daha doğru bir eşyağış haritasına ulaşmak mümkündür. Ancak elde edilecek haritanın çalışma bölgesinin yağış karakteristiğine göre düzeltilmesi gerekli olabilir.
- Doğu Karadeniz Bölgesi kıyı kesimi için çıkarılan düzeltilmiş eşyağış haritasına dayanarak elde edilen akış katsayılarının bölge ağırlıklı ortalaması yaklaşık 0.70 olarak bulunmuştur.
- Çalışma bölgesi için eşyağış haritası çıkarımında kullanılmak üzere elde edilen akım yüksekliği ve muhtemel evapotranspirasyon haritası; bölgede bu türde ölçümü bulunmayan noktalar açısından bakıldığında, kullanıcıya faydalı olabilecek niteliktedir. Bu çalışmada elde edilen haritalar, bölge için mevcut haritalara göre kullanıcıya daha gerçekçi sonuçlar sunabilecektir.

Semboller

A	Kıyı açısı
MET	Muhtemel evapotranspirasyon
PET	Potansiyel evapotranspirasyon
Y	Enlem
$Z^*(x_0)$	Tahmin noktasındaki yağış değeri
$Z^*(x_i)$	Çevre noktadaki yağış değerleri
$Z(x)$	x noktasındaki yağış değeri
$Z(x+h)$	$x+h$ noktasındaki yağış değeri
β	Regresyon katsayısı
γ	Yarıvaryogram
λ_i	Ağırlık
μ	Hata terimi, Lagrange sabiti

Teşekkür

Yazarlar çalışmaya desteğinden dolayı TÜBİTAK'a ve makalenin gelişmesine katkıda bulunan hakemlere teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Daly C., Neilson R.P. ve Phillips D.L., A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 2, 140–158, 1994.
- [2] Tabios III, G.Q. ve Salas, J.D., A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation, *Water Resources Bulletin*, 21, 3, 265–380, 1985.
- [3] Pardo-Iguzquiza, E., Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography, *International Journal of Climatology*, 18, 1031-104, 1998.
- [4] Hevesi, J.A., Istok, J.D. ve Flint, A.L., Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, Part I: structural analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 661–676, 1992a.
- [5] Hevesi, J.A., Istok, J.D. ve Flint, A.L., Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part II: isohyetal maps, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 677–688, 1992b.
- [6] Dirks K.N., Hay J.E., Stow C.D. ve Harris, D., High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island, Part II: interpolation of rainfall data, *Journal of Hydrology*, 208, 3–4, 187–193, 1998.
- [7] Goovaerts, P., Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, 228, 113–129, 2000.
- [8] Lloyd, C. D., Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain, *Journal of Hydrology*, 308, 128-150, 2005.
- [9] Basistha A., Arya D.S. ve Goel, N.K., Spatial distribution of rainfall in Indian Himalayas-A case study of Uttarakhand region, *Water Resources Management*, 22, 1325-1346, 2008.
- [10] Hastenrath, S. L., Rainfall distribution and regime in Central America, *Theoretical and Applied Climatology*, 15, 3, 201-241, 1967.
- [11] Park, J.I. ve Singh, V.P., Temporal and spatial characteristics of rainfall in the Nam River dam basin of Korea, *Hydrological Processes*, 10, 1155-1171, 1996.
- [12] Baker, D.R., Lynn, B.H., Boone, A., Tao, W.K. ve Simpson, J., The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze-initiated precipitation, *Journal of Hydrometeorology*, 2, 2, 193–21, 2001.
- [13] Marquinez, J., Lastra, J. ve Garcia, P., Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis, *Journal of Hydrology*, 270, 1–11, 2003.
- [14] Naoum, S. ve Tsanis, I. K., Orographic precipitation modeling with multiple linear regression, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 2, 79-102, 2004.

- [15] Bostan P. A. ve Akyurek Z., Exploring the mean annual precipitation and temperature values over Turkey by using environmental variables, Poster presentation, ISPRS Joint Workshop: Visualization and Exploration of Geospatial Data, Germany, 2007.
- [16] Ranhao S., Baiping Z. ve Jing, T., A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing mountains, Mountain Research and Development, 28, 3-4, 318-325, 2008.
- [17] Sun, W., Zhu, Y., Huang, S. Ve Guo, C., Mapping the mean annual precipitation of China using local interpolation techniques, Theoretical and Applied Climatology, 119, 1, 171-180, 2015.
- [18] Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J. ve Grabs, W., Global composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balances, Documentation for UNH-GRDC Composite Runoff Fields, v.1.0, Global Runoff Data Center, Koblenz, Germany, 2000.
- [19] Adam, J. C., Clark, E. A. ve Lettenmaier, D. P., Correction of global precipitation products for orographic effects, Journal of Climate, 19, 15-38, 2006.
- [20] Xia, Y., Adjustment of global precipitation data for orographic effects using observed annual streamflow and the LaD model, Journal of Geophysical Research, 113, D04106, 2008.
- [21] Eris E. ve Ağırlioğlu, N., Effect of coastline configuration on precipitation distribution in coastal zones, Hydrological Processes, 23, 3610-3618, 2009.
- [22] Eriş, E. ve Ağırlioğlu, N., Kıyı alanlarında kıyı şeklinin yağış dağılımına etkisi, Bildiriler Kitabı, 6. Ulusal Hidroloji Kongresi, 428-438, Denizli, 2010.
- [23] SHODB (Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı), Karadeniz Meteoroloji Atlası, İstanbul; 39, 1991.
- [24] Agiralioglu, N., Cigizoglu, H.K., Yilmaz, L., Coskun, H.G., Aksoy, H., Toprak, Z.F., Eris, E., Alganci, U., Andic, G., Usta, G., Besiktas, M., Ulken, I., Akım ölçümleri olmayan akarsu havzalarında teknik hidroelektrik potansiyelin belirlenmesi, 188, TÜBİTAK, Proje No 106M043, 2009.
- [25] Coulibaly, M. ve Becker, S., Spatial interpolation of annual precipitation in South Africa- Comparison and evaluation of methods, Water International, 32 (3), 494-502, 2007.
- [26] Vasiliades, L. ve Loukas, A., Precipitation spatial interpolation methods assessment in Pinios River Basin, Greece, Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology, A1523-1530, 2009.
- [27] Kaya, N., Sarımsaklı akarsuyuna olan beslenme miktarının akım gözlemlerinden faydalanarak hesaplanması, DSİ Teknik Bülten, 101, 1-17, 2006.
- [28] Akın M. ve Akın, G., Suyun önemi, Türkiye’de su potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 47, 2, 105-118, 2007.

- [29] Huang, W.C. ve Yang, F.T, Streamflow estimation using Kriging, Water Resources Research, 34, 6, 1599-1608, 1998.
- [30] Turc, L., Le Bilan D'eau des sols. Relation entre les precipitation, l'évaporation et l'écoulement, Annales Agronomique, 5, 491– 595, 1954.
- [31] Pike, J. G., Estimation of annual run-off from meteorological data in tropical climate, Journal of Hydrology, 2, 2, 116-123, 1964.
- [32] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [33] Bozkurt, D., Turuncuoglu, U., Sen, O.L., Onol, B., Dalfes, H.N., Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean-Black Sea region: evaluation of the reference period, Climate Dynamics, 39, 207-225, 2012.

Doğu Karadeniz Havzası'nın L-Momentlere Dayalı Taşkın Frekans Analizi[†]

Ali Ünal ŞORMAN'ın katkıları *

Karadeniz bölgesinin sık sık taşkına maruz olması ve bu konunun bölgesel ve L-Momentlere dayalı olarak Frekans Analizinin uygulanması Türkiye için oldukça önemlidir. Bu çalışmada çeşitli tekerrürlere dayalı taşkın debilerinin çalışılmış olması ve ölçümü olmayan ve aynı homojen özelliği taşıyan bölgeler için de önerilmesi çalışmanın önemini birkat daha artırmaktadır. Bahsi geçen denklemlerin geliştirilmesi sırasında bazı açıklamaların yapılması yararlı olacaktır. Bu konular aşağıda sıralanmıştır.

1. Tablo 3 de sunulan parametrelere ilave olarak Tablo 13 de verilen istatistiksel bilgiler dışında her bir havza için model parametrelerinin de vermesi
2. Modelde kullanılan ve bağımsız değişkenler diye adlandırılan değerlerin kendi aralarındaki korelasyon ilişkilerinin (katsayılar) var olup olmadığı böylelikle bu değişkenlerin gerçekten bağımsız olup olmadıklarının gösterilmiş olması.
3. Tablo 14 de verilen regrasyon denklemlerin katsayıları (bi) yanında standardize edilmiş katsayılarının da (ti) verilmesi.
4. Önerilen regrasyon denklemlerinde tekerrür aralığına bağlı olarak katsayılarının önemli sayılacak değişikliklerin gözlenmemiş olması
 - i. Bağımsız değişkenlerini önem sırasına göre istatistiksel bir yaklaşımla otomatik seçilmesi ve kendi aralarında bağımlılık gösteren parametrelerin kullanılmaması
 - ii. Yada girdi parametrenin tamamı kullanılmak isteniyor ise o zaman Ana Bilişkenler Yöntemi ile (PCA) ile herbir vektörden birer etken değişkenin seçiminin yapılarak modelin kurulması.

[†] Tuğçe ANILAN, Ömer YÜKSEK, Murat KANKAL, Teknik Dergi Cilt 27, Sayı 2, Nisan 2016. 7403-7427

* Yakın Doğu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Lefkoşa, KKTC - aliunal.sorman@neu.edu.tr
ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - sorman@metu.edu.tr

YAZARIN YANITI

Tartışmacı yazar, çalışmada yer alan analizlere yönelik oldukça önemli yapıcı katkılar önermiştir. Yazarlar, makaleyi dikkate değer bularak inceleyen ve öneriler sunan tartışmacıya teşekkürlerini sunar. Yöneltilen önerilere verilen cevaplar aşağıda sunulmuştur.

1- Her bir havza için model parametrelere ait bilgiler Anılan, 2014 [1]'te bulunmakta olup sayfa sınırlaması sebebi ile buraya eklenememiştir.

2- Regresyon analizinde çoklu doğrusal bağlantıyı tanımlamak oldukça önemli bir konudur. Çoklu doğrusal bağlantı, bağımsız değişkenlerin sadece bağımlı değişken üzerinde etkisinin olması değil aynı zamanda kendileri arasında birbirleri üzerinde de etkilerinin olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır [2]. Eğer bağımsız değişkenler arasındaki basit doğrusal korelasyon katsayıları 1'e yakınsa bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişkinin varlığı söz konusudur. Değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantıyı tanımlamak için "varyans enflasyon faktörü" (VIF) ve Tolerans değerlerinden faydalanılır:

$$\text{Tolerans} = 1 - R^2 \quad (1)$$

$$\text{VIF} = \frac{1}{\text{Tolerans}} \quad (2)$$

Çoklu doğrusal bağlantı ile ilgili olarak aynı bilgiyi veren VIF ve Tolerans değerlerinden sadece birine bakılarak karar verilir. Tolerans değeri çoklu korelasyon olmaması durumunda bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı düşük olacağı için Tolerans değeri bire yaklaşacak, VIF'ler ise sifıra yaklaşacak; bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişkinin olması durumunda tolerans değeri sifıra, VIF değerleri sonsuza gidecektir. Genel olarak, Tolerans değeri sifıra yaklaştıkça ve VIF 10'u aşarsa çoklu doğrusal bağlantı durumu artacaktır. 10'dan yüksek VIF değeri çoklu doğrusal bağlantı problemine sebep olur [3, 4, 5, 6].

Tablo 1. Bağımsız değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantı tanılaması

Variables	Tolerance	VIF
A	0.534	1.872
DY	0.882	1.134
E	0.765	1.307
K	0.904	1.106
Y	0.259	3.862
YŞ	0.241	4.153

Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken ile çoklu doğrusal bağlantısı SPSS paket programı ile değerlendirilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi, Tolerans değeri 0’dan büyük ve maksimum VIF değeri olan 4.153 ise 10’dan küçüktür. Sonuçlar bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olmadığını açıkça göstermektedir.

3- T=5, 10, 25, 100, 500 yıl tekerrür süreli Q’lara ait standardize edilmiş katsayılar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Standardize edilmiş katsayılar

Denklem: $\ln Q = w_0 + w_1 A - w_2 DY - w_3 E - w_4 K + w_5 Y + w_6 YŞ$						
Model	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀
A	0.890	0.877	0.852	0.823	0.790	0.678
DY	-0.104	-0.081	-0.045	-0.013	0.015	0.077
E	-0.051	-0.043	-0.031	-0.020	-0.010	0.014
K	-0.239	-0.265	-0.299	-0.323	-0.341	-0.372
Y	0.310	0.248	0.139	0.051	-0.030	-0.165
YŞ	0.253	0.317	0.417	0.487	0.549	0.602

4- Önerilen regresyon denklemlerinde tekerrür aralığına bağlı olarak katsayılar da önemli sayılacak değişikliklerin olmamasının nedeninin debi değerlerinin “Ln Q” olarak hesaba katılması olarak açıklanabilir. Ancak tartışmacı yazar görüşü doğrultusunda temel bileşenler analizi aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Değişkenler arasındaki ilişkilerin önemli olup olmadığını belirlemek, aralarındaki bağımlılık yapısının yok edilmesi veya boyut indirgeme amacı ile veri setine temel bileşenler analizi uygulanmıştır.

Özdeğer sayısını belirlemek için Tablo 3’de “toplam başlangıç özdeğerleri” kolonunda

$$\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{p} \geq 0.8 \text{ koşulunu sağlayan } \lambda \text{ sayısına ya da “toplam başlangıç özdeğerleri”}$$

kolonunda 1’den büyük λ sayısına bakılır [7]. Burada 1’den büyük 3 adet özdeğer olduğu görülmektedir. Koşul sağlandığı için 3 tane temel bileşen olduğu söylenebilir.

Tablo 3. Açıklanan varyans yüzdesi

Bileşen (λ)	Başlangıç özdeğerleri		
	Toplam	Varyansın %'si	Kümülatif %
1	2,366	39,439	39,439
2	1,259	20,991	60,430
3	1,057	17,618	78,048
4	,829	13,821	91,869
5	,349	5,816	97,685
6	,139	2,315	100,000

λ_1 toplam varyansın %39.4'ünü, λ_2 %20.9'unu ve λ_3 de %17.6'sını açıklamaktadır. Üçü birlikte toplam varyansın yaklaşık %78'ini açıklamaktadır. Yani çalışmada kullanılan altı değişkenli veri setini, üç temel bileşenle de açıklamak mümkündür. Böylece bağımlılık yapısı ortadan kaldırılabilir ve temel bileşenler analizinin amacı olan boyut indirgeme sağlanabilecektir.

- [1] Anılan, T., Doğu Karadeniz Havzası'nın L-Momentlere Dayalı Taşkın Frekans Analizinde Yapay Zeka Yöntemlerinin Uygulanması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
- [2] Mekanik, F., Imteaz, M.A., Gato-Trinidad, S., Elmahdi, A. Multiple Regression and Artificial Neural Network for Long-Term Rainfall Forecasting Using Large Scale Climate Modes. Journal of Hydrology., 503:11–21, 2013.
- [3] Lio, R.X., Kuang, J., Gong, Q., Hou, X.L. Principal Component Regression Analysis with SPSS. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 71(2):141–147, 2003.
- [4] Lin, F.J. Solving Multicollinearity in The Process of Fitting Regression Model Using the Nested Estimate Procedure. Quality and Quantity, 42(3):417–426, 2008.
- [5] Qi, W.W., Zhang, B.P., Yao, Y.H., Zhao, F., Zhang, S., He, W.H. A Topographical Model for Precipitation Pattern in the Tibetan Plateau. Journal of Mountain Science, 13(5):763–773, 2016.
- [6] Ghiaei, F., Kankal, M., Anılan, T., Yüksek, O. Regional Intensity-Duration-Frequency Analysis in the Eastern Black Sea Basin, Turkey, by Using L-Moments and Regression Analysis. Theoretical and Applied Climatology, DOI: 10.1007/s00704-016-1953-0, 2016.
- [7] Sarbu, C., Pop, H. F. Principal component analysis versus fuzzy principal component analysis: a case study: the quality of Danube water (1985–1996). Talanta 65.5: 1215-1220, 2005.

Frequency Based Prediction of Büyük Menderes Flows[†]

Fatih DİKBAŞ¹

ABSTRACT

In this study, a new method for the data driven prediction of interrelated and chaotic time series data showing seasonal fluctuations is proposed. The method produces predictions based on the temporal and quantitative relationships among the available data related with the frequencies of the value ranges of observed data. The method, which is called frequency based prediction, has a general approach and requires no testing/validation/adjustment/weight determination steps. The developed method is used for predicting 9050 monthly total flow observations of 34 stations on Büyük Menderes River and for infilling 1210 missing data. High correlations obtained between the observations and predictions for all stations show that the proposed method is successful in the prediction of streamflow data.

Keywords: *Frequency based prediction, data-driven modeling, monthly total streamflow data, Büyük Menderes Basin, estimation of missing data.*

1. INTRODUCTION

Accurate, reliable and complete observations are required for the modeling and estimation of the components of the hydrologic cycle. Determination of the spatial and temporal quantitative variations of these data plays an important role for hydrological analysis and design of water resources systems. River flows constitute an important process of the hydrologic cycle and a vast amount of methods exist for the scientific evaluation of river flows. Monthly total river flows are frequently used in hydrologic studies and there are many random factors influencing the amount of flow rates. Though the river flows generally show seasonality, the high variability of the numerous influencing factors causes a chaotic and a relatively random behavior. This behavior makes the modelling and prediction of flow rates challenging.

In recent decades, with the developments in software technologies, traditional hydraulic and hydrologic models have been supported/complement by data-driven methods [1] (Solomatine 2008). A data-driven model involves the analysis of time series data but it should not be regarded as a computational exercise ignoring physical processes. Determination of the spatial and temporal interrelationships among time series-data like river flow rates is mathematically equivalent to the determination of the relationships between the functions generating flow rates. In fact, an observed flow rate is a result of a function that combines all of the parameters generating the flow rate. In this view, working

¹ Pamukkale University, Denizli, Turkey - f_dikbas@pau.edu.tr

[†] Published in Teknik Dergi Vol. 27, No. 1 January 2016, pp: 7325-7343

directly on river flow time-series data becomes a study that does not ignore any of the contributing parameters of the river flow rate function (even though the relations and the variations of the parameters are not evaluated).

The power of basic data driven modelling techniques has already been proven and the researchers are working for making data-driven models more robust, understandable and really useful for managers [1]. Samples from the huge amount of data-driven modeling studies in literature on hydrological processes may be listed as follows:

Artificial Neural Networks (ANN) is a widely used method and was implemented in research subjects like modelling rainfall–runoff processes [2-4], river forecasting [5-6], estimation of suspended sediment concentration [7], modelling of evapotranspiration [8] and developing rainfall intensity-duration-frequency curves [9].

Fuzzy Rule Based Systems were used in areas like drought assessment [10], prediction of precipitation events [11], modelling of hydrological extremes [12], modelling rainfall-discharge dynamics [13] and flood forecasting [14].

Support Vector Machines has gained popularity among researchers in recent years and rainfall-runoff modelling [15], precipitation forecasting [16] and stream flow forecasting [17-19] are some of the application areas.

Instance-based learning [20]; runoff estimation by machine learning methods [21] and flood forecasting using ANN, Neuro-Fuzzy, and Neuro-GA Models [22] are among other remarkable data driven modelling studies. An experimental investigation of the predictive capabilities of data driven modeling techniques in hydrology was presented by Elshorbagy et al. [23].

In most of the existing studies, the time series data is regarded as a one dimensional vector. Generally hydrological time series have an annual cycle of seasonality and a two-dimensional matrix containing a full cycle in each row represents the temporal behavior of the variable in a more comprehensible way than a one-dimensional vector. For example, river flows generally show fluctuations through a year but they are reluctant to be out of the observed range in the same month of different years. A conditionally formatted two-dimensional matrix perfectly illustrates this two-directional behavior. In this study, the river flow observations are used so that the months are in columns and the years are in rows of the matrices.

The proposed frequency based prediction method has a methodology developed for estimating and forecasting interrelated and chaotic time series data showing seasonal fluctuations. The estimations are deduced from the temporal and quantitative relationships among the available data by determining the frequencies of the value ranges of observed data. The method produces estimations on which observation range is possible at what probability for any missing value. This approach enables making multiple estimations for a single missing value by making use of the determined highest frequencies of observed ranges. The method has a general approach and requires no learning / testing / validation / adjustment / weight coefficient determination / smoothing steps contrary to many existing data driven methods. The estimations for the missing values are determined by using the available data in one step. The only value to be determined in advance is the maximum

number of clusters and this value should be determined according to the quantitative structure of the available data.

The proposed method is used for the estimation of 9050 monthly total flow observations and 1210 missing values of 34 flow rate observation stations located on Büyük Menderes River. The stations are chosen so that the different regions of the river are well represented, this enabled testing the success of the method in the estimation of data from stations showing variations in data length and values. Figure 1 shows the locations of the chosen stations. No evaluation could be made on the branch flowing from Uşak region towards the station 065 located at the downstream exit of Adıgüzel Dam Lake as there is no observation station on the branch. Weak side branches and creeks are not shown on the figure.

The observation lengths of the evaluated stations vary between 8 years (station 07-114) and 41 years (stations 07-003, 004 and 010). The data of seven stations are complete and the number of missing values in the remaining stations vary between 12 and 122. The mean number of missing values is 36. In most of the stations, the minimum flow rate observation is zero and in some stations there is no zero observation in the investigated period. The mean monthly total flow observations for all stations is 18.9 hm^3 . The station with the lowest mean in the whole observation period is the station 07-097 with an average value of 0.3 hm^3 , and station with the highest mean is the station 07-062 with an average of 219.3 hm^3 . The maximum monthly total flow rates observed in the monitored periods vary between 2.8 hm^3 (07-097) and 1121 hm^3 (07-062). The elevations of the stations are within the range 17 m (07-062) and 1145 m (07-111). The characteristics of the stations are presented together with the statistical comparisons of estimations and observations in Table 5.

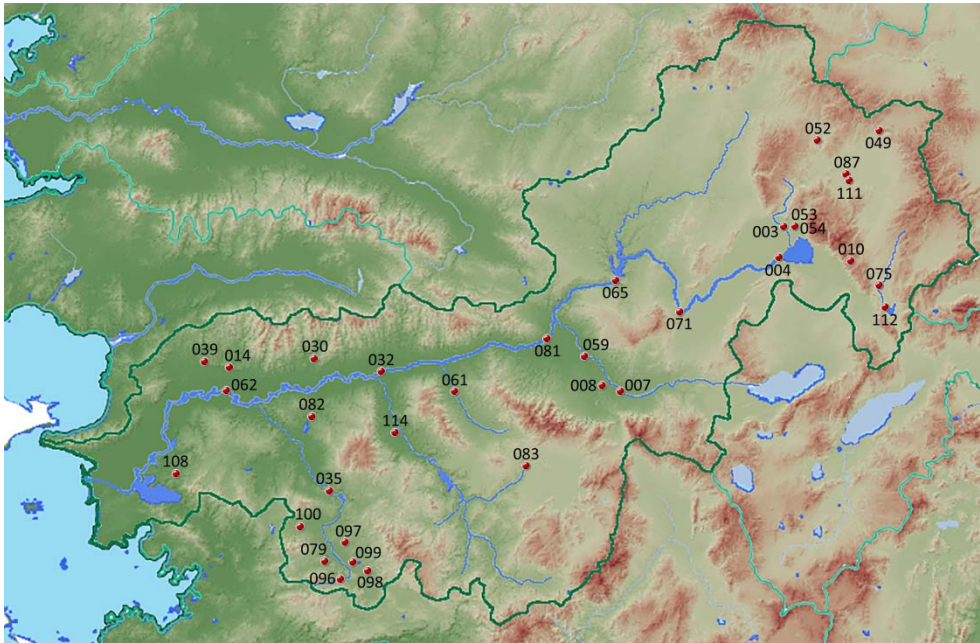


Figure 1. The flow rate observation stations chosen in Büyük Menderes Basin

2. FREQUENCY BASED PREDICTION OF FLOW RATE DATA

A pair of data in a set of data formatted as a matrix represents the temporal and quantitative behavior of the observed variable at the smallest scale. With statistical reasoning, valuable information can be extracted from the relationships within the data set and estimations on the missing values can be made. The main idea behind the proposed method is that all the adjacent pairs in the observed data set contain information about the temporal and quantitative variation of flow rates and possible value ranges of the neighboring observations might be estimated by using the extracted information.

The basic concept of the method is that any value in a data series showing periodic behavior has strong relationships with closer observations and weak quantitative associations with distant observations. The proposed frequency based prediction method produces estimations based on the recurrences of the quantitative relationships among neighboring cells covering a 7 x 7 sized area (Figure 2) around any data cell in the matrix. The neighborhood region does not have to be 7 x 7 in size but was sufficient for obtaining successful estimations for all of the 34 data sets investigated in this study. Use of a wider neighborhood region might unnecessarily increase the required computation time.

For example, the monthly total river flow series investigated in this study show seasonal fluctuations and lower values are experienced in summer months while higher values are observed in winter months. For this reason, when a data in January is being estimated, the frequencies of observed data pairs in a 7 month (October-April) and 7 year range in which the required month is at the center are used instead of the summer observations. Similarly, when a missing value in August is being estimated, the 7 month period between May-November is used. In this way, for the whole data series, estimations based on the frequencies of the data pairs with highest quantitative and temporal associations can be obtained while the adverse impacts that might be caused by the weakly or even inversely associated data pairs are prevented.

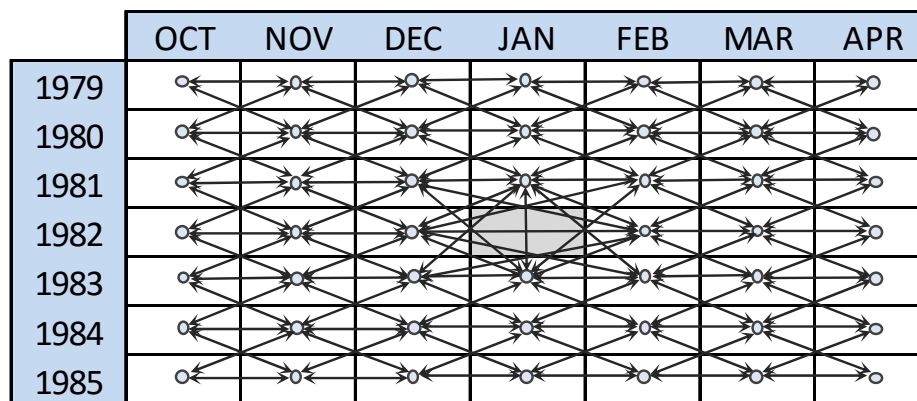
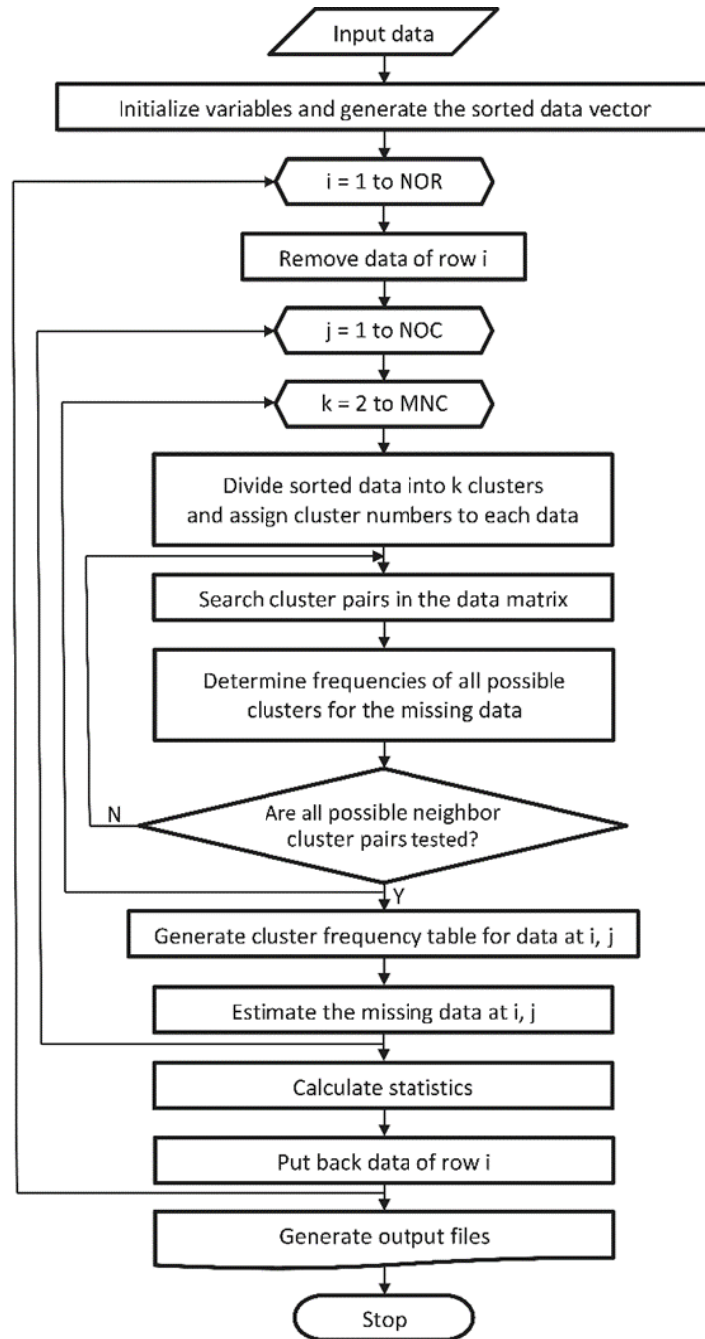


Figure 2. The data pairs to be searched in the data matrix for the purpose of determining the cluster frequencies.



NOTE: NOR: Number of rows, NOC: Number of Columns, MNC: Maximum number of clusters

Figure 3. The flowchart of the frequency based prediction method.

The flowchart in Figure 3 shows the general application procedure of the method. First, the observed values are read from the input file and a three-dimensional vector containing the sorted data and their coordinates on the data matrix is generated by sorting the data in ascending order. The coordinate information is crucial because the observation time of any value is very important in the investigation of the temporal and quantitative investigation of a time series data. Sorting and making statistical investigations on a variable without considering the observation times of each individual variable means ignoring information on the temporal relationships between observations. In the presented method, sorting is made to determine the range clusters of all observations.

A range cluster is obtained by dividing the observations sorted from the lowest to the highest into sets with as equal a number of elements as possible. The observed range in each station is divided into 2 to 12 range clusters and the method is applied for each cluster setup. The maximum number of clusters was set to 12 for the flow rate data used in this study and the obtained results seem to be sufficient, but a different number of clusters might be required in the investigation of other variables. The number of clusters should be chosen according to the behavior of the time-series and the amount of observations. As the method generates estimations by removing observed values from the series, the optimum number of clusters may easily be determined by trying different numbers of clusters.

Two different approaches may be used in the generation of the clusters and the determination of cluster indexes showing the cluster to which the observations are assigned. In the first approach, each cluster has as equal a number of elements as possible and the clusters have varying ranges. Equation 1 is used to assign observed values to clusters.

In the second approach, range values are equalized and the clusters have a varying number of elements. The bounds of the cluster ranges are the lowest and highest observations belonging to that range. Equation 2 is used to assign observed values to clusters.

$$Cl_i = \text{int} \left(\frac{i * n_{cl}}{n_d} \right) + 1 \quad (1)$$

$$Cl_i = \text{int} \left(\frac{(X_i - X_{min}) * n_{cl}}{X_{max} - X_{min}} \right) + 1 \quad (2)$$

In the above equations:

n_d : The total number of observations in the sorted data vector.

i : The index number of the observation (changes between 1 and n_d)

Cl_i : The cluster index to be assigned to the i^{th} observation (This value changes between 1 and 12 for the observations used in this study).

$\text{int}()$: The function converting a decimal number into an integer

n_{cl} : The number of clusters used to divide the sorted data vector (This value is 12 for the observations used in this study).

X_i : The i^{th} observation in the sorted data series

X_{min} ; X_{max} : The minimum and maximum observations in the whole data series.

Both approaches have advantages and disadvantages over each other. Selection of the appropriate clustering method completely depends on the diversity of the observed time series. For example, if the number of elements in certain clusters become too high compared to other clusters, then it would be better to generate clusters with an equal number of elements. But, in this situation, it must not be forgotten that the value ranges of the clusters with extreme values will increase and the higher values might be underestimated.

2.1. The Application of the Proposed Method

The primary aim of the method proposed in this study is the estimation of missing values in time-series data. As each hydrologic time series has a different set of values, the estimation success of a method varies from one station to another. The estimation success even varies for various portions of a time series. This situation requires that the method proven to be giving good estimates for a station should be tested with existing observations prior to producing estimates for the missing values in another station. For testing the estimation success of the proposed method, each row in each data matrix is removed and estimated one by one by using the relationships among remaining data. This process is automatically implemented by the developed software and the estimation success of the method is statistically evaluated by comparing the obtained estimations and observations. In this process, the missing values in the dataset are also estimated together with the deliberately removed observations.

For a comprehensive explanation of the method, the estimation steps of the application of the method on the monthly total flow rate observations of station 07-010 Dinar-Irgilli (Turkey) for the 1982 water year will be presented. The data set covers 466 observations between the years 1960-2000. The monthly mean flow in the observed period is $7.7 \text{ m}^3/\text{s}$ and the average of monthly total flows is 5.92 hm^3 . The highest value was observed in May 1970 (18.2 hm^3) and the lowest value was observed in June, July and August 1995 (0 hm^3). All observations in 1974 and 1975 and October and November observations of 1960 are missing. When the long year averages of monthly total flow rates are calculated, the highest value was obtained for March (8.97 hm^3) and the lowest value was obtained for August (1.73 hm^3).

When the data series is divided into clusters, a cluster index is assigned to each data. When the data series is divided into 12 clusters, the cluster index values assigned to the neighbors of October 1982 (the cell to be estimated, shown with blue border in Tables 1.a and 1.b) are shown in Table 1.b. No cluster index is assigned to the missing values and to the data removed for testing the estimation performance of the method.

It is possible to generate questions as follows within the neighborhood of the missing data and it is also possible to find the associations related with these questions in other regions of the matrix:

What might the total flow in October 1982 be when the total flow in September 1980 is 3.33 hm^3 and the total flow in October 1981 is 8.88 hm^3 (the red rectangle in Table 1.a)?

Frequency Based Prediction of Büyük Menderes Flows

What might the total flow in October 1982 be when the total flow in August 1982 is 0.75 hm³ and the total flow in September 1982 is 1.75 hm³ (the yellow rectangle in Table 1.a)?

These two questions might be expressed as follows by using the cluster indexes:

What might the cluster value of the missing cell in October 1982 be when the cluster value in October 1980 is 6 and the cluster value in October 1981 is 10?

What might the cluster value of the missing cell in October 1982 be when the cluster value in August 1982 is 4 and the cluster value in September 1982 is also 4?

Table 1.a) The neighbors of the missing cell, b) The cluster indexes of the neighbors, c) The cluster indexes of the first matching region

	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN
1979	0.20	0.20	0.96	3.29	4.13	7.43	10.20
1980	0.24	0.24	0.23	3.33	7.62	9.50	9.13
1981	1.74	1.95	4.94	8.88	10.70	10.90	13.30
1982	0.60	0.75	1.75				
1983				7.05	8.21	8.34	8.74
1984	0.25	0.83	0.73	2.94	7.96	10.00	9.17
1985	2.49	2.89	5.28	6.87	10.00	10.30	10.90

a

	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN
1979	3	3	4	6	6	8	10
1980	3	3	3	6	9	10	10
1981	4	4	7	10	11	11	12
1982	4	4	4				
1983				8	9	9	10
1984	3	4	4	5	9	10	10
1985	5	5	7	8	10	11	11

b

	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
1961	9	7	7	6	5	5	6
1962	9	8	7	6	6	6	7
1963	10	12	12	10	9	10	11
1964	10	9	8	4	3	5	6
1965	11	11	11	9	9	10	12
1966	12	12	11	10	9	10	12
1967	12	12	9	7	6	10	11

c

The two questions above investigate the value of the concerned missing data by assessing the quantitative relationships between the observed values within the neighborhood region of the data to be estimated. 158 similar unique questions may be asked about the searched value by using the horizontal, vertical and diagonal data pairs in the neighborhood of the missing data shown with a blue border. The adjacent data pairs in the neighborhood of October 1982 are shown in Table 1.a. As each cell has a different location on the data matrix, the 7 x 7 sized neighborhood region for each cell is also special to each cell.

The answer for these two sample questions and the answers to the questions generated by using the remaining data pairs in the neighborhood of the missing data are searched by finding matches within the data matrix. For example, to find the answer to the first question, vertically adjacent values of 6 and 10 are searched through the whole matrix. The first match is found for the clusters of July 1962 and 1963 located in the data region shown in Table 1.c. It is also seen in the same table that the cluster indexes of September 1962 and 1963 are 6 and 10 respectively. The cluster values just below these two mated pairs are 4 and 5 respectively. The search is resumed through the whole dataset and the frequencies of

the clusters just below the horizontally adjacent 6 and 10 are determined. The search is repeated for all 158 diagonally and horizontally adjacent cluster pairs located within the neighborhood region of the questioned missing value and the frequencies of the clusters in the relative location of the October 1982 data are increased by one in each match. When the search for all cluster pairs is completed, the total frequencies of the 12 clusters will be found and the frequency values shown in the 12th column of the frequency table given for the month October in Table 2 are obtained. The cluster with the highest frequency is regarded as the cluster with the highest probability and the cluster with the lowest frequency is regarded as the cluster with the lowest probability.

The process for 12 clusters is repeated for all the procedures of generating 2 to 11 clusters and the cluster frequency table for October 1982 is obtained. For this purpose, the sorted data series is divided into two clusters so that one cluster includes the lower values and the other cluster includes the higher values. Then, each data point is assigned a cluster index: 1 for the data in the first cluster (the lower values) and 2 for the data in the second cluster (the higher values). After the assignment of the cluster indexes, the cluster frequencies are determined and estimations are made. When the process for two clusters is completed, the sorted data series is divided into three clusters so that each cluster has as equal number of observations as possible and again each data point is assigned a cluster index ranging from 1 to 3. Then new frequencies are calculated and estimations are made. These processes are repeated by increasing the cluster number by one at each step and the process ends after the estimations are made for the highest number of clusters. At the end of the clustering and frequency determination processes, the cluster frequency tables constituting the base of the missing data estimations will have been generated (Table 2).

The dark green regions in the frequency tables show the data ranges with higher probability and the regions with red color show the data ranges with lower probability. The columns with the titles “Min” and “Max” on the right of Table 2 show the value ranges for each cluster when the number of clusters is 12. For example, the value range for the 4th cluster, which has the highest frequency among the 12 clusters, is 2.0-3.3 hm³.

Table 2 shows the cluster frequency tables generated for the months of 1982 water year for the station 07-010. The title numbers of the columns show the cluster numbers to which the data set is divided and the title numbers of the rows show the cluster indexes. For example, in the table generated for the month October, when the data series is divided into two clusters the frequency of the first cluster was 7491 and the frequency of the second cluster was 12345. These values indicate that the monthly total flow rate value of October 1982 might most probably be within the value range of the second cluster. When the data set is divided into 12 clusters, the highest frequency (112) was obtained for the 4th cluster. While the frequency tables obtained for the months showing a high rate of variability like October and November are blurry, the red and green paths follow a more apparent path in the frequency tables obtained for the months like March, April and August for which the variability is lower.

Frequency Based Prediction of Büyük Menderes Flows

Table 2. The cluster frequency tables generated for the 1982 data of the station 07-010

OCT												NOV												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	7491	1601	525	234	161	78	27	22	0	0	0	1	6078	1085	283	148	78	48	14	15	0	0	0	0.0	0.0
2	12345	4106	1673	741	459	207	151	124	78	63	38	2	16304	4236	1567	541	260	131	96	72	38	35	11	0.0	0.1
3		4552	2030	1074	679	464	268	173	69	61	46	3		7219	2332	943	621	267	162	93	32	43	21	0.1	0.5
4			1963	1004	691	453	317	231	198	188	112	4			3296	1323	711	381	349	210	161	141	69	0.5	2.0
5				1042	521	395	314	167	167	127	87	5				1622	842	470	340	170	138	130	117	2.0	3.3
6					541	339	228	307	164	81	101	6					927	503	292	305	147	95	77	3.3	4.9
7						237	244	105	135	134	72	7						468	353	188	186	167	70	4.9	6.3
8							187	180	95	83	106	8							314	270	157	98	110	6.3	7.4
9								145	112	89	56	9								258	168	127	116	7.4	8.6
10									68	118	76	10									145	142	98	8.6	10.2
11										66	82	11										140	117	10.2	12.3
12											35	12											107	12.3	18.2
DEC												JAN												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	5756	773	244	87	54	23	13	2	0	0	0	1	5660	749	201	57	26	6	1	0	0	0	0	0.0	0.0
2	20701	4217	1354	450	138	77	42	41	15	18	4	2	23838	4555	1262	472	139	76	63	32	24	1	4	0.0	0.1
3		9706	2660	928	579	237	126	70	25	23	15	3		11845	2909	1076	531	209	130	56	27	24	16	0.1	0.5
4			5105	1564	799	355	286	141	139	127	39	4			7002	1809	836	324	257	153	134	110	36	0.5	2.0
5				2577	1131	463	335	191	125	95	91	5				3274	1276	439	338	253	139	103	118	2.0	3.3
6					1533	694	372	252	161	122	100	6					2202	782	381	293	203	178	99	3.3	4.9
7						810	457	300	219	143	73	7						1253	624	342	212	102	102	4.9	6.3
8							544	366	185	129	136	8							883	431	230	156	103	6.3	7.4
9								376	282	135	133	9								643	374	213	153	7.4	8.6
10									246	223	162	10									312	355	187	8.6	10.1
11										192	167	11										290	279	10.2	12.3
12											173	12											252	12.3	18.2
FEB												MAR												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	5579	802	226	59	13	7	6	0	0	0	0	1	5547	957	264	90	31	5	7	0	0	0	0	0.0	0.0
2	24891	4517	1111	444	146	65	51	11	9	4	2	2	22971	3905	957	518	233	75	44	25	11	4	4	0.0	0.1
3		12965	2842	987	401	194	115	52	36	26	17	3		11721	2541	858	369	113	98	96	43	18	26	0.1	0.5
4			7090	1874	780	322	193	137	94	74	36	4			7064	1723	729	325	151	94	56	48	42	0.5	2.0
5				3877	1393	362	335	234	133	91	67	5				3978	1366	319	260	170	114	59	53	2.1	3.3
6					2765	863	367	263	196	224	102	6					2881	915	342	211	168	180	75	3.3	4.9
7						1660	587	398	225	85	135	7						1664	605	302	169	103	115	4.9	6.3
8							1114	531	234	169	87	8							1178	565	258	134	98	6.3	7.4
9								800	501	274	171	9								716	512	257	116	7.4	8.6
10									377	453	225	10									419	450	233	8.6	10.2
11										338	344	11										334	373	10.2	12.3
12											264	12											251	12.3	18.2
APR												MAY												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	6530	1275	442	179	92	27	7	1	0	0	0	1	8551	1980	770	336	188	78	38	18	0	0	0	0.0	0.0
2	20588	3512	1064	623	360	126	105	81	27	19	22	2	15795	3416	1389	907	653	300	259	172	82	77	66	0.0	0.1
3		10195	2250	780	364	201	141	120	72	59	48	3		7205	1922	819	465	358	254	135	92	149	89	0.1	0.5
4			6377	1490	653	353	136	79	74	97	39	4			4400	1098	610	390	148	153	125	123	58	0.5	2.1
5				3612	1191	282	285	147	60	43	55	5				2617	903	215	321	196	69	67	103	2.1	3.3
6					2729	832	289	180	136	178	66	6					2018	647	236	151	168	172	68	3.3	4.9
7						1438	620	261	155	83	137	7						1156	436	211	110	84	130	5.1	6.3
8							1149	570	248	134	69	8							904	423	197	76	43	6.4	7.4
9								646	458	303	99	9								507	380	228	80	7.5	8.6
10									397	417	232	10									256	330	164	8.7	10.3
11										305	332	11										197	267	10.3	12.2
12											223	12											183	12.3	18.2
JUN												JUL												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	11197	2978	1288	571	291	133	81	34	0	0	0	1	12988	4131	1653	822	464	209	133	54	0	0	0	0.0	0.0
2	11025	3099	1786	1339	1013	629	514	290	155	174	103	2	7405	2158	1845	1369	1441	1009	738	448	310	319	172	0.0	0.1
3		4578	1506	780	574	456	352	255	189	255	199	3		2180	1090	704	520	406	389	417	222	305	274	0.1	0.5
4			2842	773	525	374	190	200	166	161	82	4			1118	446	375	312	189	148	129	186	84	0.5	2.1
5				1756	585	220	235	246	79	78	124	5				687	349	176	169	157	65	63	109	2.1	3.3
6					1289	435	221	149	85	105	52	6					475	221	163	80	86	74	43	3.4	5.1
7						788	331	158	102	63	91	7						352	127	107	42	34	71	5.1	6.4
8							659	293	145	56	39	8							269	111	66	52	15	6.4	7.5
9								303	283	150	73	9								129	101	59	66	7.5	8.7
10									216	214	101	10									78	90	26	8.7	10.3
11										142	200	11										59	73	10.3	12.2
12											122	12											54	12.3	18.2
AUG												SEP												Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	13633	4712	1660	905	471	225	151	51	0	0	0	1	14059	4061	1359	729	405	183	107	19	0	0	0	0.0	0.0
2	5891	2333	2311	1552	1671	1184	679	519	359	289	152	2	9620	3465	2816	1451	1430	997	460	403	280				

2.2. Calculation of the Missing Values According to the Frequency Tables

Various approaches may be used for estimating the missing values in the dataset by making use of the cluster frequency tables. For example, instead of making a definite estimation, the value ranges of the clusters with the highest frequency might be evaluated as estimation ranges. Furthermore, the location where the direction of the regions with distinct green tones in the frequency tables cut the value range table might be used as the estimation value of the missing data. In this study, the method followed in the estimation of the missing values and the values deliberately removed from the data set is as follows: The sums of the observations generating the frequency of each cluster in the frequency table generation process are calculated. When the process of frequency table generation ends, the sum of the observations generating the frequency values will be determined. The highest 5 frequencies among the frequencies obtained for the 12 clusters are determined and sorted in descending order. As seen in Table 2, for the data of October 1982, the 5 clusters with highest frequencies are 4th, 8th, 6th, 5th and 11th clusters respectively. The most probable 5 estimations for October 1982 are calculated by dividing the total observation values obtained for each cluster to the cluster frequency values. The real observed value in October 1982 is 4.42 hm³ and this value is within the value range of the 6th cluster and the estimated value for this cluster is 3.77 hm³.

The estimation process is repeated for the remaining months of the year and the first five most probable estimation values are obtained for each month. Table 3.a shows the first 5 most probable values obtained for each month of 1982 together with the real observations and the values closest to the observed real values among the 5 estimations. The correlations between the estimations and observations are provided on the right of the table. The nearest estimations to the observations are indicated with bold font. Among the 12 estimated values, 6 of the nearest estimations are obtained in the first estimation series, 2 of them are obtained in the second estimations and the remaining 4 nearest values are obtained in the third estimations. The correlation between the first estimations and the observations is 0.859 while the correlations between the best estimations among the first three estimations and the observed values is 0.980. As it is clearly seen, the first three estimations were sufficient for obtaining the best estimations for the data of the evaluated year and the 4th and 5th estimations did not contribute to the improvement of correlation between the estimations and observations. It must again be noted that the observed values of the year 1982 were removed from the data set prior to the implementation of the method and these values are not known in any step of the estimation process. The proposed method generates multiple estimations for both the missing values and the values deliberately removed from the data set.

For testing the estimation success of the proposed method, 5 different estimation series for the 1982 observations of the station 07-010 are generated by using multiple linear regression. In the calculations, the observed values in 1982 are removed from the data set, as was done in the proposed method, and estimations are obtained by using the remaining observations. The observed values and the correlations between the observed and estimated values are presented in Table 3.b together with the best estimation values. It is observed that the estimations of the proposed method are generally closer to the observations when compared to the estimations obtained by multiple linear regression.

Frequency Based Prediction of Büyük Menderes Flows

Table 3.a. The observations of the station 07-010 in 1982; the first 5 most probable estimations determined by the proposed frequency based prediction method; correlations between the estimations and the observations.

Month	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	
Observation	4.42	7.98	10.30	10.60	9.55	11.70	11.30	10.40	5.65	0.56	0.93	1.73	Corr.
Estimation 1	1.15	2.70	14.47	11.13	11.13	11.16	11.21	11.22	11.31	0.26	0.25	0.86	0.859
Estimation 2	6.66	11.36	11.12	14.36	14.32	14.34	9.32	14.37	0.28	0.04	0.97	0.25	0.898
Estimation 3	3.77	7.95	9.31	9.27	9.22	9.39	14.42	9.40	2.72	2.68	0.04	0.05	0.926
Estimation 4	2.63	6.80	6.77	7.98	8.02	8.08	5.56	5.66	14.40	1.27	2.76	2.84	0.522
Estimation 5	11.19	14.53	7.90	2.61	5.59	5.66	8.15	2.62	0.03	11.31	4.17	4.03	-0.106
Nearest Est.	3.77	7.95	11.12	11.13	9.22	11.16	11.21	11.22	2.72	0.26	0.97	0.86	0.980

Table 3.b. The observations of the station 07-010 in 1982; 5 estimations determined by using multiple linear regression; correlations between the estimations and the observations.

Month	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	
Observation	4.42	7.98	10.30	10.60	9.55	11.70	11.30	10.40	5.65	0.56	0.93	1.73	Corr.
Estimation 1	1.07	4.13	17.50	6.13	2.32	8.74	9.90	14.70	2.68	0.21	0.31	5.28	0.681
Estimation 2	0.50	16.30	8.40	7.11	13.60	15.10	6.91	11.90	0.24	10.20	0.31	0.79	0.581
Estimation 3	2.97	10.70	7.49	5.20	7.23	7.61	12.90	6.19	0.28	0.06	0.00	2.53	0.798
Estimation 4	0.04	11.60	3.10	15.00	2.44	8.01	17.70	6.19	14.20	0.42	0.57	0.04	0.603
Estimation 5	3.21	2.48	17.50	3.27	6.29	15.10	6.91	6.25	0.24	9.82	0.18	10.20	0.294
Nearest Est.	3.21	10.70	8.40	7.11	7.23	8.74	9.90	11.90	2.68	0.42	0.57	2.53	0.892

The number of estimations to be made might be decreased or increased according to the variability of the evaluated data set. As it is well known that the river flow series show a relatively chaotic behavior and the most probable flow rate value might not become the observed flow rate. For this reason, having multiple estimations at hand for a missing value will be very helpful for the researchers, practitioners and the administrators. Generation of 5 estimations for the flow rate series of the stations evaluated in this study was sufficient for obtaining successful estimations.

The increase of correlations between the observations and the estimations are evaluated according to the increasing estimation number for testing the advantage of calculating more than one estimation for a missing data. Table 4 shows the correlations between the observed series of the station 07-010 and the nearest estimations within the first 2, 3, 4 and 5 estimations for each year and for the whole series.

Annual correlations over 0.7 occurred between the observed values and the nearest estimates in the first two estimations in 77% of cases (30/39). This rate increased to 90% (35/39) for the first three and four estimates and to 97% (38/39) for the first five estimates. The rate of correlations over 0.9 for the first 2, 3, 4 and 5 estimations are 38% (15/39), 56% (22/39), 77% (30/39) and 85% (33/39) respectively.

The last column of Table 4 shows the correlations between the whole series consisting of 466 observations and the estimations nearest to the observations in the first 2, 3, 4 and 5 estimations. The correlation of 0.84 obtained for the first two estimations might be regarded to be sufficient in practice but the correlations became higher than 0.9 when the number of estimations were increased and the correlation for the whole series became 0.97 when 5 estimations were calculated. This correlation value might be considered as a high and reliable value for the estimation of monthly total flow series.

These results show that increasing number of estimations provide a higher reliability and precision but it must not be forgotten that in some cases even when the estimations come closer to the observations, the correlation value might decrease. For example, in Table 4, it is seen that the correlation values for the year 1966 decrease with the increase of the number of estimations. This situation is caused by the function used in the calculation of correlation but the situation in which the correlation value decreases when the estimations become closer to the observations is rarely experienced and generally better estimations produce better correlations. As the purpose in the modelling of hydrologic variables is usually obtaining estimations close to the observations, the correlation coefficient alone is not sufficient for making statistical evaluations. For this reason, looking at more than one statistical parameters enable making better assessments.

Table 4. The correlations between the observations of the station 07-010 and the best estimations within the first five estimation series

Estimations	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
1-2	0.46	0.70	0.22	0.64	0.63	0.22	0.93	0.58	0.74	-0.35	0.83	0.95
1-3	0.36	0.72	0.41	0.94	0.85	0.72	0.89	0.83	0.69	0.04	0.86	0.85
1-4	0.34	0.61	0.55	0.97	0.90	0.87	0.88	0.82	0.93	0.68	0.86	0.88
1-5	0.89	0.89	0.70	0.98	0.97	0.97	0.88	0.94	0.92	0.68	0.88	0.93
Estimations	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
1-2	0.95	0.90			0.88	0.62	0.91	0.83	0.94	0.81	0.91	0.84
1-3	0.96	0.92			0.96	0.89	0.89	0.96	0.97	0.93	0.98	0.87
1-4	0.97	0.94			0.98	0.91	0.97	0.97	0.97	0.95	0.98	0.96
1-5	0.97	0.91			0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99
Estimations	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
1-2	0.94	0.76	0.79	0.78	0.73	0.79	0.59	0.97	0.72	0.95	0.95	0.99
1-3	0.96	0.95	0.93	0.92	0.84	0.91	0.85	0.98	0.78	0.96	0.96	0.99
1-4	0.98	0.97	0.95	0.91	0.94	0.94	0.92	1.00	0.93	0.97	0.98	0.99
1-5	0.99	0.98	0.97	0.92	0.98	0.95	0.93	1.00	0.93	0.97	0.98	0.99
Estimations	1996	1997	1998	1999	2000	Whole						
1-2	0.87	0.87	0.90	0.90	0.92	0.84						
1-3	0.94	0.93	0.95	0.90	0.93	0.91						
1-4	0.96	0.98	0.97	0.94	0.97	0.94						
1-5	1.00	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97						

The graphs in Figure 4 compare the estimations of the frequency based prediction method with the observations of the station 07-010. Even though the flow rates have shown significant variations within the observation period, a good fit between the observations and estimations was obtained. The estimation performance for the extreme values observed in 1966, 1969 and 1970 were relatively low. This situation is caused by the approach implemented by the method. As the method tries to estimate the most probable value for a missing data, the low probabilities of the extreme values which are observed only a few times through the observation period cause the estimations to remain low. The capability of the method in estimation of the extreme values might be improved by considering the temporal and spatial variations of hydrologic variables like precipitation which are directly associated with flow rates.

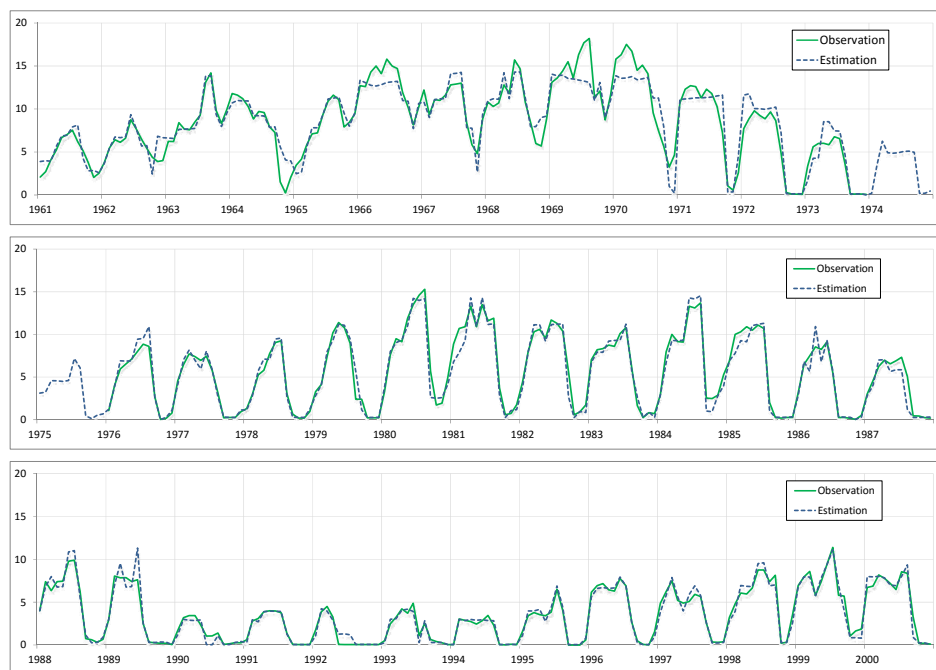


Figure 4. The comparison of the observations of the station 07-010 with the estimations of frequency based prediction method.

3. APPLICATION OF THE FREQUENCY BASED PREDICTION METHOD ON THE REMAINING 33 STATIONS

All the above considerations were about the estimations of the observations of a single station (07-016). One might propose that the success of a method in the estimation of the values of a single station is not sufficient to claim that it will be successful in the estimations of other stations. To test this, the proposed method was used to estimate the observations of the remaining 33 stations located in the Büyük Menderes Basin. As can be seen in Figure 1, the stations are selected so that various flow properties in various regions of the river are well represented.

Table 5. Statistical comparison of the observed and estimated flow rate series and some characteristics of the stations

STATION	r	Na-Su.	NRMSE	MASE	Obs.Yr.	n	Miss.	Min.	Mean	Max	Elev.
07-003	0.93	0.83	0.06	0.35	41	480	12	0.0	7.1	95.5	837
07-004	0.93	0.86	0.06	0.36	41	456	36	0.0	33.3	162.0	814
07-007	0.99	0.98	0.05	0.20	16	177	15	0.0	8.0	23.6	260
07-008	0.97	0.93	0.05	0.40	22	264	0	0.0	5.5	12.9	300
07-010	0.97	0.93	0.06	0.48	41	466	26	0.0	5.9	18.2	841
07-014	0.90	0.79	0.06	0.35	39	419	49	0.0	5.7	65.3	70
07-030	0.91	0.82	0.08	0.37	39	408	60	0.0	2.7	20.6	177
07-032	0.97	0.94	0.05	0.37	38	396	60	4.6	112.1	447.0	68
07-035	0.94	0.87	0.06	0.32	36	402	30	0.1	24.1	216.0	112
07-039	0.85	0.68	0.05	0.35	36	381	51	0.0	1.8	36.9	73
07-049	0.93	0.86	0.07	0.38	29	240	108	0.0	2.4	17.7	1025
07-052	0.91	0.81	0.07	0.39	33	381	15	0.0	1.2	11.6	980
07-053	0.94	0.89	0.07	0.61	37	322	122	0.7	9.9	29.8	829
07-054	0.99	0.97	0.05	0.25	30	288	72	0.0	1.6	6.9	829
07-059	0.98	0.96	0.05	0.27	33	321	75	0.0	22.6	61.2	160
07-061	0.88	0.71	0.08	0.53	31	252	120	0.1	5.4	31.3	197
07-062	0.95	0.89	0.06	0.33	33	355	41	4.7	219.3	1121.0	17
07-065	0.93	0.86	0.08	0.39	31	324	48	0.0	64.5	206.0	307
07-071	0.96	0.90	0.08	0.33	31	372	0	1.0	27.5	86.4	758
07-075	0.94	0.88	0.07	0.36	24	239	49	0.0	0.7	4.9	1010
07-079	0.91	0.77	0.08	0.43	21	171	81	0.0	2.0	15.0	355
07-081	0.89	0.78	0.08	0.58	20	216	24	10.0	64.3	249.0	150
07-082	0.89	0.75	0.10	0.45	18	202	14	0.0	2.5	21.7	111
07-083	0.75	0.47	0.10	0.94	18	216	0	0.2	2.8	29.8	855
07-087	0.95	0.89	0.08	0.30	15	180	0	0.0	1.0	5.5	1067
07-096	0.89	0.77	0.08	0.35	13	143	13	0.0	0.7	6.2	450
07-097	0.95	0.85	0.08	0.29	11	120	12	0.0	0.3	2.8	425
07-098	0.78	0.58	0.09	0.38	13	156	0	0.0	0.4	5.7	500
07-099	0.88	0.75	0.09	0.40	13	139	17	0.0	0.9	7.2	395
07-100	0.91	0.79	0.07	0.32	13	156	0	0.0	0.8	8.8	325
07-108	0.90	0.77	0.11	0.39	11	120	12	0.0	0.8	5.2	160
07-111	0.85	0.70	0.07	0.34	10	120	0	0.0	1.0	11.4	1145
07-112	0.82	0.64	0.15	0.93	10	84	36	0.5	4.1	8.1	1005
07-114	0.84	0.66	0.09	0.38	8	84	12	0.0	1.5	16.0	140
Min:	0.75	0.47	0.05	0.20	8	84	0	0.0	0.3	2.8	17
Mean:	0.91	0.81	0.08	0.41	25.1	266.2	36	0.65	18.9	90.2	492.6
Max:	0.99	0.98	0.15	0.94	41	480	122	10.0	219.3	1121.0	1145

The method was used in the estimation of 9050 observed and 1210 missing monthly total flow values. The observation series are located in matrices as explained in Section 2 and estimations were obtained after each row was removed from the matrices in turn. Table 5 presents the statistical evaluations of the obtained results together with some characteristics of the stations. For testing the success of the method in the estimation of observed values, correlation coefficient, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, normalized root mean squared error (NRMSE) and mean absolute scaled error (MASE) statistics which are frequently used in the statistical evaluation of hydrologic variables are calculated for all stations. The observation periods of the stations as years, the total number of existing monthly observations (n), the number of missing values, the minimum, mean and maximum monthly total flow values and the elevations of the stations are presented together with the statistical evaluations.

While the correlation value exceeds 0.75 for all stations, it exceeds 0.85 for 88% and 0.9 for 68% of the stations. The highest correlation value was 0.99 and was obtained for the stations 07-007 and 07-054. Likewise, the correlation value exceeded 0.9 for all stations with observation periods longer than 21 years. This situation shows that the increase in observation length has a positive impact on the estimation performance. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients vary between 0.47 (station 07-083) and 0.98 (station 07-007) and 86% exceeds 0.7, 65% exceeds 0.8 and 21% exceeds 0.9. The NRMSE values vary between 0.05 (stations 07-007, 008, 032, 039, 054 and 059) and 0.15 (station 07-112) and 88% of them are under 0.1. The MASE values range between 0.2 (station 07-007) and 0.94 (07-083) and 71% of them are under 0.4.

The statistical evaluations show that the estimation performance of the method is generally at a very good level. These results which were obtained by comparing the observed series and the estimation series provide sufficient proof for the success of the method in the estimation of monthly total flow series of the evaluated 34 stations. As was mentioned above, any method should be implemented on the available data prior to claiming that the method will be successful in the estimation of the considered series. Still, the observed results are so promising that the method might be successful in the estimation of other flow series. As the developed method has a general approach, it has a potential of being applied on other hydrologic variables or various time series data from other scientific disciplines like biostatistics, economics and social sciences.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This study presents a data driven methodology named frequency passed prediction and the method was used for the estimation of 9050 monthly total flow rate observations and imputation of 1210 missing values from 34 stations on Büyük Menderes Basin. The observations are removed from the data sets annually in groups of 12 and estimated by using the remaining observations of the evaluated station. Estimation of missing data by using the observation series is the main aim of the developed method. The statistical comparisons of the estimations and observations show that the method successfully generates estimations for the deliberately removed observations of all of the 34 stations. Through the implementation of the method, the missing values in the data set were also estimated. The advantages of the proposed method may be summarized as follows:

- The method has a general approach and can be applied on any two dimensional data in one step without making any calibration, smoothing or weight determination.
- A pre-determined number of multiple estimations are determined for all missing values. The obtained estimations are the most probable estimations according to the proposed approach and the comparisons with the observed series show that the calculated estimations are successful for all series of from all stations. This feature is especially useful in evaluating variables with chaotic behavior like streamflow.
- The obtained results for the 34 flow rate observation stations show that the method can be used reliably in the estimation of monthly total flow rate records.

Acknowledgement

The author would like to thank The General Directorate of the State Hydraulic Works of Turkey (DSİ) for providing the data used in this study and the editorial board and the reviewers for their valuable contributions and comments, which greatly improved the manuscript.

References

- [1] Solomatine, D. P., Abrahart, R. J., See, L. M., Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences. Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications, R. J. Abrahart, L. M. See and D. P. Solomatine, (editörler), Springer, Berlin, 17-30, 2008.
- [2] Dawson, C. W., Wilby, R., An Artificial Neural Network Approach to Rainfall-Runoff Modelling. *Hydrol. Sci. J.*, 43(1), 47-66, 1998.
- [3] Govindaraju, R. S., Ramachandra, R.A., Artificial Neural Networks in Hydrology, Kluwer, Dordrecht, 2001.
- [4] Tayfur, G., Singh, V. P., ANN and Fuzzy Logic Models for Simulating Event-Based Rainfall-Runoff. *J. Hydraul. Eng.*, 132(12), 1321-1330, 2006.
- [5] Abrahart, R. J., Anctil, F., Coulibaly, P., Dawson, C. W., Mount, N. J., See, L. M., Shamseldin, A. Y., Solomatine, D. P., Toth, E., Wilby, R. L., Two Decades of Anarchy? Emerging Themes and Outstanding Challenges for Neural Network River Forecasting. *Prog. Phys. Geogr.*, 36(4), 480-513, 2012.
- [6] Huo, Z., Feng, S., Kang, S., Huang, G., Wang, F., Guo, P., Integrated Neural Networks for Monthly River Flow Estimation in Arid Inland Basin of Northwest China. *J. Hydrol.*, 420-421, 159-170, 2012.
- [7] Bhattacharya, B., Van Kessel, T., Solomatine, D. P., Spatio-Temporal Prediction of Suspended Sediment Concentration in the Coastal Zone Using Artificial Neural Network and a Numerical Model. *J. Hydroinform.*, 14(3), 574-594, 2012.
- [8] Adamala, S., Raghuwanshi, N. S., Mishra, A., Tiwari, M. K. Evapotranspiration Modeling Using Second-Order Neural Networks. *J. Hydrol. Eng.*, 19(6), 1131-1140, 2014.

- [9] Mirhosseini, G., Srivastava, P., Fang, X., Developing Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves for Alabama Under Future Climate Scenarios Using Artificial Neural Networks. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000962 , 04014022, 2013.
- [10] Pesti, G., Shrestha, B. P., Duckstein, P., Bogárdi, I. A., Fuzzy Rule-Based Approach to Drought Assessment. *Water Resour. Res.*, 32(6), 1741-1747, 1996.
- [11] Abebe, A. J., Solomatine, D. P., Venneker, R., Application of Adaptive Fuzzy Rule-Based Models for Reconstruction of Missing Precipitation Events. *Hydrol. Sci. J.*, 45 (3), 425-436, 2000.
- [12] Bogardi, I., Duckstein, L., Pongracz, R., Galambosi, A., Experience With Fuzzy-Rule-Based Modeling of Hydrological Extremes. *Proc., Risk-Based Decisionmaking in Water Resources IX*, ASCE, Reston, VA, 44-60, 2001.
- [13] Vernieuwe, H., Georgieva, O., De Baets, B., Pauwels, V. R. N., Verhoest, N. E. C., De Troch, F. P., Comparison of Data-Driven Takagi–Sugeno Models of Rainfall–Discharge Dynamics. *J. Hydrol.*, 302(1-4), 173-186, 2005.
- [14] Nayak, P. C., Explaining Internal Behavior in a Fuzzy If-Then Rule-Based Flood-Forecasting Model. *J. Hydrol. Eng.*, 15(1), 20-28, 2010.
- [15] Bray, M., Han, D., Identification of Support Vector Machines for Runoff Modelling. *J. Hydroinf.*, 6, 265-280, 2004.
- [16] Chen, X., Zhu, S., Improved Hybrid Model Based on Support Vector Regression Machine for Monthly Precipitation Forecasting. *J. Computers*, 8(1), 232-239, 2013.
- [17] Lin, J. Y., Cheng, C. T., Chau, K. W., Using Support Vector Machines for Long-Term Discharge Prediction. *Hydrol. Sci. J.*, 51(4), 599-612, 2006.
- [18] Kişi, Ö., Çimen, M., A Wavelet-Support Vector Machine Conjunction Model for Monthly Streamflow Forecasting. *J. Hydrol.*, 399(1-2), 132-140, 2011.
- [19] Karahan, H., İplikçi, S., Gürarşlan, G., River Flow Estimation From Upstream Flow Records Using Support Vector Machines, *J. Appl. Math.*, 2014
- [20] Solomatine, D. P., Shrestha, D. L., Maskey, M., Instance Based Learning Compared to Other Data-Driven Methods in Hydrological Forecasting. *Hydrol. Process.*, 22, 275-287, 2007.
- [21] Yılmaz, A. G., Muttil, N., Runoff Estimation by Machine Learning Methods and Application to the Euphrates Basin in Turkey. *J. Hydrol. Eng.*, 19(5), 1015-1025, 2014.
- [22] Mukerji, A., Chatterjee, C., Raghuwanshi, N. S., Flood Forecasting Using ANN, Neuro-Fuzzy, and Neuro-GA Models. *J. Hydrol. Eng.*, 14(6), 647-652, 2009.
- [23] Elshorbagy, A., Corzo, G., Srinivasulu, S., Solomatine, D. P., Experimental Investigation of the Predictive Capabilities of Data Driven Modeling Techniques in Hydrology - Part 1: Concepts and methodology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1931-1941, 2010.

Mevsimsel Yağışların Jeostatistiksel Yöntemle Modellenmesi ve Gözlemi Olmayan Noktalarda Tahmin Edilmesi

Hatice ÇITAKOĞLU¹

Mahmut ÇETİN²

Murat ÇOBANER³

Tefaruk HAKTANIR⁴

ÖZ

Yağış zamansal ve mekansal olarak fazla değişkenlik gösteren bir meteorolojik veridir. Literatürde yağışların zamansal değişimi ile ilgili pekçok araştırma yayını mevcuttur. Bu çalışmada, Türkiye genelinde gözlenmiş aylık yağış verileri kullanılarak, jeostatistiksel yöntemle mevsimsel yağışların mekansal değişimleri incelenmiştir. Bunun için, Türkiye sınırları içerisinde yer alan 20 yıl ve daha fazla kayıt uzunluğuna sahip 200 adet yağış gözlem istasyonunun Ocak–Aralık dönemine ait aylık ortalama yağış değerleri kullanılmıştır. Dört mevsim yağış haritalarının Gaussian tip yarıvariogram ile temsil edilebileceği ve mevsimsel yağışların mekânsal değişiminin jeostatistik yöntem ile yeterli doğrulukta tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda, yağış ölçümü olmayan coğrafik konumlarda mevsimsel yağış miktarlarının kolaylıkla ve doğru olarak tahmin edilebilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mevsimsel yağışlar, jeostatistik, kriging, yarıvariogram.

ABSTRACT

Modeling of Seasonal Precipitation with Geostatistical Techniques and Its Estimation at Un-gauged Locations

Precipitation is a meteorological data exhibiting large variations both temporally and spatially. There are quite a few research publications in literature related to temporal variation of precipitation. In this study, the spatial variation of seasonal precipitation is investigated using the monthly precipitation data measured all over Turkey. For this purpose, the monthly average values pertaining to the January–December period based on recorded data of at least 20-year length observed at 200 rain-gauging stations existing within the boundaries of Turkey are used. It is determined that the precipitation maps of

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 05.06.2015 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - hcitakoglu@erciyes.edu.tr

2 Çukurova Üniversitesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Adana - mcet64@cu.edu.tr

3 Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - mcobaner@gmail.com

4 Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - thaktan@erciyes.edu.tr

four seasons can be depicted by a Gaussian type semivariogram and the spatial variation of seasonal precipitation can be estimated by this geostatistical method at sufficient accuracy. The outcome of the study enables the magnitude of seasonal precipitation at ungauged geographical locations to be estimated easily with sufficient accuracy.

Keywords: Seasonal precipitation, geostatistics, kriging, semivariogram.

1. GİRİŞ

Hidroloji ve su kalitesi dâhil olmak üzere havza yöntemi uygulamalarında yağış yüksekliği önemli bir parametredir. Yağış yükseklikleri, yağış gözlem istasyonlarındaki standart yağış ölçeklerinde noktasal olarak mm birimiyle ölçülür. Yeryüzündeki her noktaya bir gözlem istasyonu kurma olanağı bulunmadığı için her noktada gözlem yapmakta mümkün değildir. Ayrıca, tek bir ölçer kullanılarak belirlenen yağış yüksekliği, yüzey akışında belirsizliklere neden olmaktadır [1,2]. Özellikle, çalışma alanına uzak yağış ölçerin kullanılması akış, yer altı su seviyesi ve toprak neminin tahmininde zorluklara neden olmaktadır [3]. Havza bazında yapılan büyük ölçekli su kaynaklarının sürdürülebilir yönetim çalışmalarında yağış verilerinin zamansal ve özellikle mekânsal değişimi önemli bir parametredir. Bu nedenle, mühendislik çalışmalarında sıkça ihtiyaç duyulan ve belirlenmiş bir alan üzerindeki ortalama yağış derinliğini ifade eden alansal yağışın ölçülmesi de olası değildir [4]. Dolayısıyla, alansal yağış, bir takım yöntemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

Gözlem yapılamayan noktalardaki gerek alansal gerekse noktasal yağış tahminleri, aritmetik ortalama, Thiessen poligonları, optimum enterpolasyon, izohiyet eğrileri vb yöntemlerden biri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Ancak, bu yöntemlerle yapılan tahminler genelde objektif olmayıp; yetersiz ve yanlıdır. Ayrıca bu yöntemler, yapılan tahmine ilişkin varyans hakkında bilgi de verememektedir [4]. Ülkemizde noktasal ve alansal yağış tahminlerinde en sık kullanılan yöntem Thiessen poligonları yöntemidir. Bu yöntemde yağışın karakteristik özellikleri ve üzerinde çalışılan havzanın fizyografyası göz önüne alınmamakta, izohiyet eğrileri yönteminde ise, izohiyetler çizilmeden önce bölgedeki gözlem istasyonları verileri arasındaki bağımlılık derecesi ve bağımlılık yapısı hakkında bir ön çalışma yapılmamaktadır [4, 5].

Hidrometeorolojik veriler olasılığa bağlı değişkenler olup alansal tahminlerde bu tür verilerin kullanılabilmesi amacıyla esas bileşenler analizi kullanılmaktadır. Esas bileşenler analizi bir alandaki gözlem istasyonları arasındaki kolerasyon fonksiyonuna bağlıdır. Bu yöntemle kısa periyotlu istasyonlardaki kaydedilmemiş verileri ve hiç gözlem yapılmamış noktalardaki değerler tahmin edilebilmektedir [6]. Önsoy ve ark. [7] 1929-1972 yılları arasında gözlemlenen Türkiye'deki 40 istasyona ait yağış verilerine esas bileşenler analizini uygulamıştır. Çalışmanın sonucunda ise bu yöntemin büyük bölgelerde hataların olabileceğini ve küçük havzalarda uygulaması, gerçeğe daha yakın sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir. Hidrolojik değişkenlerin haritalamasında kullanılan bir diğer yöntem ise Üçgensel Hidrolojik Enterpolasyon (MTH) yöntemidir. Üçgensel hidrolojik enterpolasyon (MTH) yöntemi stasyonel bölgesel değişkenler üzerinde uygulanmakta olup her bir üçgenin düğüm noktaları arasında basit kübik enterpolasyon yapılmaktadır[8]. Önsoy ve Bayram [8], Türkiye'yi, üçgenler ağı oluşturarak, yağış değerlerinden oluşturulan korelasyon matrisi öz vektör değerlerinde uygulamasını yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda diğer yöntemlerle pratik olarak aynı sonuçları verdiğini tespit edilmişlerdir. Önsoy ve Bayram [9], çalışmalarında Türkiye'nin tamamına MTH, Thiessen ve enterpolasyonlu elle çizim

yöntemlerini uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, bu üç yöntem ile tahmin edilen yağış değerlerinin, hemen hemen aynı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında kullandıkları MTH yönteminde, her bir üçgen ünite içerisinde varyansın sabit olması kabulü, üçgen üniteler büyüdükçe, zayıflayacağını belirtmektedirler. Karahan ve ark. [10] GAP bölgesinde yer alan meteoroloji istasyonlarına ait yağış Şiddet-Süre-Frekans ilişkisinin belirlenmesinde enlem, boylam ve yükselti verilerini kullanarak bağıntı geliştirmiş ve yağış ölçümü bulunmayan veya ölçüm süresi kısıtlı yerleşim yerlerinin yağış şiddet-süre-frekans ilişkisinin belirlenebileceğini ifade etmişlerdir.

Tarım alanlarında değişik amaçlara yönelik olarak yapılmış çalışmalarda, örnekleme yerlerinden alınan verilerin göstereceği değişkenliğin incelenmesinde, klasik istatistiksel yöntemler yeterli olmamaktadır. Çünkü klasik istatistikte herhangi bir değişkene ilişkin varyans ve standart sapmanın hesaplanmasında gözlemlerin yapıldığı yerin coğrafi konumu, gözlem noktalarının birbirlerine göre konumları ve gözlemler arasındaki korelasyon dikkate alınmamaktadır. Söz konusu soruna çözüm getirmek amacıyla Matheron, 1960'lı yıllarda “*yöresel değişkenlik*” kuramını ortaya atmıştır. Söz konusu teknik, ilk olarak maden mühendisliğinde maden rezervlerinin belirlenmesinde kullanıldığı için “*Jeostatistik*” olarak tanımlanmıştır. Jeoloji biliminde kullanımı yaygınlaşan *jeostatistiksel* yöntemler, zamanla diğer bilim alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin; Çetin ve ark. [11] tarafından yapılan bir çalışmada, toprak ve taban suyuna ilişkin bazı fiziksel ve kimyasal özellikler *jeostatistik* ve *probabilistik* yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla, incelenen değişkenlerin uzaysal bağımlılık yapıları modellenmiş ve haritalanarak alansal dağılımları saptanmıştır. Buytaert ve ark. [12] Thiessen poligonu ve kriging yöntemlerini kullanarak Güney Ekvador Andes’ daki yağış verilerinin mekânsal ve zamansal değişkenliğini çalışmışlardır. Çalışmalarında, kriging yöntemiyle yapılan mekânsal enterpolasyonun, Thiessen poligonu ile yapılan mekânsal enterpolasyondan daha iyi olduğunu ve her iki yöntemin doğruluğu, dış eğilimler dâhil edildiğinde artabileceğini belirtmişlerdir. Basistha ve ark. [13] deterministik ve jeostatistiksel yöntemleri kullanarak Hint Himalayalar’ındaki yağış verilerinin mekânsal dağılımını incelemişlerdir. Universal Kriging’in en uygun yöntem olduğunu ve bu yöntemi sıradan kriging (ordinary kriging) ve Ters Mesafe Ağırlandırma (Inverse Distance Weighting, IDW) yöntemlerinin takip ettiğini belirtmişlerdir. Son yıllarda bazı araştırmacılar ise istatistiksel yöntemlerle elde ettikleri değerleri haritalama tekniklerini kullanarak çeşitli tekerrür periyotları için haritalar elde etmişlerdir. Karahan [14] (2011)’de ise Ege bölgesi meteoroloji istasyonlarının verilerini kullanarak kümeleme analizi, L-Momentler ve optimizasyon algoritmaları (diferansiyel gelişim) ile eksik yağış şiddetleri tahmin edilmiş ve haritalandırmıştır. Çıtakoğlu [15], İç Anadolu Bölgesinin 31 adet meteoroloji istasyonuna ait 14 adet yağış serisi verilerine L-Momentler yöntemini uygulamış olup çeşitli tekerrür periyotları için jeostatistik yöntemle haritalar elde etmiştir. Çalışmanın sonucunda ise ölçümü olmayan veya ölçüm süresi az olan yerlerdeki kısa periyotlu yağış tahminlerinin bu haritalar yardımıyla elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Literatürde yapılan pek çok çalışmada yağışların yıllık bazda tahminleri yapılmaktadır. Dünya üzerindeki yağışların sadece yıllık bazda tahminlerle değil aynı zamanda mevsimsel tahminlerle de incelenmesi önem taşımaktadır. Çünkü bitkinin dönemsel gelişimi için gerekli olan topraktaki nem miktarı mevsimsel olarak değişmektedir. Her bir bitkinin üreme-büyüme ve gelişme dönemleri farklı zamanlara karşı gelmektedir. Dünya üzerindeki bitkilerin ekim ve sulama zamanlarının değişkenlik göstermesinden dolayı yapılacak yağış

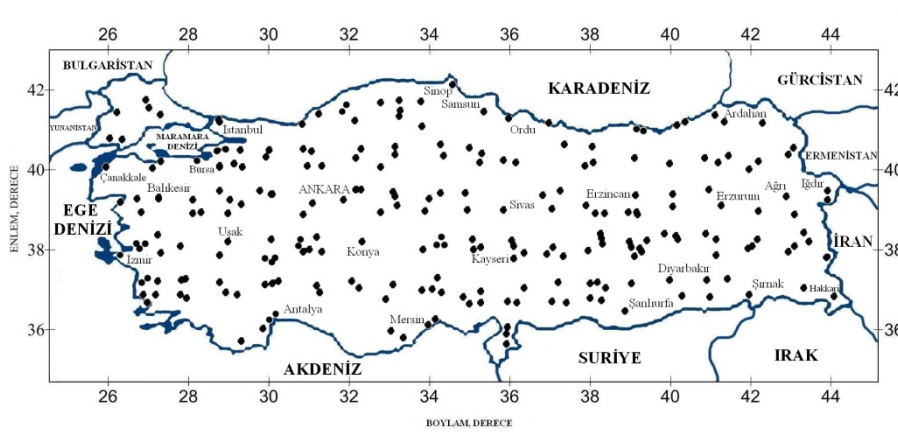
haritalarının yıllık ya da aylık ya da mevsimlik olarak elde edilmesi gerekmektedir. Subyani [16] farklı mevsimlerdeki yağışların mekanizmalarında farklılıkların oluşacağını belirtmiştir. Çalışmasında ise Suudi Arabistan'daki 21 yıllık 63 istasyonun yağış yüksekliklerinin mevsimsel ve yıllık olarak jeostatistiksel yöntemle haritalandırmasını yapmıştır. Çalışmasının sonucunda yıllık haritanın üstel tip yarıvariogram ile, kış ve ilkbahar aylarının haritalarının üstel tip yarıvariogram ile, yaz ve sonbahar aylarının haritalarının ise küresel tip yarıvariogram ile temsil edilebileceğini belirtmiştir. van de Beek ve ark. [17] Hollanda'daki günlük yağış parametrelerinin mevsimsel variogramlarının analizi için küresel tip yarıvariogram kullanmıştır.

Alansal yağış, baraj ve gölet gibi su depolama amaçlı yapıların kapasitelerinin belirlenmesinde, rezervuarların işletme çalışmalarında, sulama planlamalarında ve taşkın amaçlı rezervuar işletmesinde temel girdi olarak kullanılmaktadır. Havza ve bölgesel bazda günlük ve aylık yağışların jeostatistiksel yöntemler kullanılarak modellenmesine yönelik çalışmalara sıkça rastlanabilmektedir. Ancak, mevsimsel bazda ve Türkiye ölçeğinde yağışların uzaysal bağımlılık yapılarının saptanmasına yönelik çalışmaların genellikle yetersiz olduğu dikkati çekmektedir. Mevsimsel yağışların modellenmesi ve Türkiye ölçeğinde haritalanması sonucunda elde edilecek bilgiler, yağış bakımından kritik olan yörelerin saptanmasında ve kuraklık çalışmalarında önem arz etmektedir. Bu çalışmada, mevsimsel yağışların uzaysal bağımlılık yapılarının Türkiye ölçeğinde saptanması ve yağış gözlem istasyonu bulunmayan yöreler için mevsimsel yağış tahminlerinin yapılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada, yarı kurak iklime sahip Türkiye sınırları içerisinde yer alan 20 yıl ve daha büyük kayıt uzunluğuna sahip 200 adet yağış gözlem istasyonunun uzun yıllar aylık ortalama yağış değerleri kullanılmıştır. Bu değerler Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan 200 adet meteoroloji gözlem istasyonunun konumları ve Türkiye'deki dağılımları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Meteoroloji gözlem istasyonlarının konumu ve Türkiye'deki dağılımları

2.2. Yöntem

2.2.1. İstatistiksel Analiz

Bilimsel araştırmalarda elde edilen niceliksel veriler genellikle düzensiz durumda bulunur. Bu verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için özet bilgilerin belirlenmesi ve sayısal olarak ifade edilmesi gerekir. Özet bilgilerin belirlenmesi ve yorumlanmasında tanımlayıcı istatistikler yoğun olarak kullanılmaktadır. Tanımlayıcı istatistikler verilerin sınıflandırılarak özet tabloların oluşturulmasını, eğilim ve dağılım ölçülerinin elde edilmesini sağlarlar [5]. Tanımlayıcı istatistikle verilerin işlenmesinde aritmetik ortalama, mod, medyan, standart sapma, çarpıklık katsayısı, basıklık katsayısı gibi ölçülerden yararlanır.

Niceliksel verilerle ilgili problemlerde değişkenin ortalama değeri en anlamlı parametredir. Çünkü değişkenin merkezi, gözlenecek değerlerin çevresinde dağılacığı değeri gösterir [11]. Niceliksel verilerde ortalama *Eşitlik 1* deki gibi hesaplanır.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

Ortalama değeri etrafındaki yayılmayı ölçmek için kullanılan parametre standart sapmadır. Ancak ortalamaları farklı olan değişkenlerin hangisinde yayılmanın daha büyük olduğunu anlamak için standart sapmaların karşılaştırılması gerekmektedir [11]. *Eşitlik 2* ile standart sapmanın formülasyonu verilmiştir.

$$S = \sqrt{\text{var}(x)} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

Eşitlik 3, değişkenin çarpıklığı hakkında bilgi vermektedir. Bu sayının sıfıra eşit olması, ortalama çevresinde dağılımın simetrik olduğunu, pozitif olması sağa doğru uzanan bir kuyruğu ve negatif olması ise sola uzanan bir kuyruğu bulunduğunu göstermektedir.

$$C_s = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^3 \right]}{S^3} \quad (3)$$

Niceliksel verileri sınıflandırırken kullanılan diğer önemli bir husus da, verilerin basıklığıdır. Basıklık katsayısı, *Eşitlik 4* deki hesaplanmaktadır. Değişkenler arasında en büyük C_k katsayısına sahip olan değişkenin daha basık olduğu belirtilmektedir.

$$C_k = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^4 \right]}{S^4} \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan n değişken sayısını, y_i ise niceliksel değişkeni ifadeside edilmektedir.

2.2.2. Jeostatistik Analiz

Jeostatistiksel yöntemler; doğa olaylarının yersel değişim tavrılarının açıklanmasında, eksik verilerin tamamlanmasında vb amaçların gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [18, 19]. *Jeostatistiksel analizin* ilk aşaması *yarıvariogram* analizlerinin yapılarak uzaysal bağımlılık yapılarının modellenmesidir.

Yarıvariogram; örnek çiftleri arasındaki h uzaklığının bir fonksiyonu olarak incelenen değişkenin uzaysal bağımlılık derecesini ifade eder [4, 5, 18, 20, 21]. x_i ve x_j sırasıyla i ve j gözlem noktalarının koordinatlarını; $z(x_i)$ ve $z(x_j)$ ise i ve j gözlem noktalarında gözlenen değerleri göstermek üzere; N sayıdaki gözlemden oluşan yöresel (yersel) değişken Z ' nin deneysel yarıvariogramı, gözlemler arasındaki *Öklid* uzaklığı h ' ye bağımlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [5, 22, 23 ,24 ,25].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x_i) - Z(x_j)]; i, j = 1, N \quad (5)$$

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (6)$$

Populasyon varyansı σ^2 ve kovaryansı $C(h)$ ile *yarıvariogram* değerleri arasında sıkı bir ilişki olup, bu ilişki *Eşitlik 6* ile verilmektedir [26]. Gözlem çiftleri arasındaki vektörel uzaklık h , koordinatlara bağlı olarak *Eşitlik 7* ile hesaplanır [25, 27].

$$h = |u_i - u_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}; u_i = (x_i, y_i), u_j = (x_j, y_j) \quad (7)$$

Gözlem değerlerinden yararlanılarak hesapla oluşturulan yarıvariograma *deneysel yarıvariogram*, deneysel yarıvariograma matematiksel bir fonksiyon uydurularak elde edilen yarıvariogram modeline de *teorik yarıvariogram* denir.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_j)^2; i, j = 1, N \quad (8)$$

Eşitlik 8 ile deyimlenen deneysel yarıvariogram değerlerinin hesaplanabilmesi için gözlemlerin ikili kombinezyonlarının [28] oluşturulması ve gözlem çiftleri arasındaki h uzaklığının koordinatlar yardımıyla hesaplanması gerekmektedir. h uzaklıklarına karşılık gelen *yarıvaryans* değerleri karşılıklı olarak grafiklendiğinde, *deneysel yarıvariogram* elde edilmektedir. Elde edilen *deneysel yarıvariograma* teorik bir model uydurulması ve model parametrelerinin saptanarak uygunluk testinin yapılması ile *yarıvariogram* analizi tamamlanmaktadır [29]. Hidrolojik ve hidrometeorolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanım alanı bulan *teorik yarıvariogram modellerinin* matematiksel eşitlikleri aşağıdaki şekilde verilmiştir [4].

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right] + C_o & h \leq a \\ \gamma(h) &= C + C_o & h > a \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Küresel Tip Model} \\ \end{array} \quad (9)$$

$$\gamma(h) = C \left(1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Gaussian Model} \\ \end{array} \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C_o + C_1 \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Üstel Model} \\ \end{array} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C(h/a) + C_o & h \leq a \\ \gamma(h) &= C + C_o & h > a \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Lineer-Sill Model} \\ \end{array} \quad (12)$$

Burada; C_o , kontrolsuz etki varyansını; C , yapısal varyansı; h , gözlem çiftleri arasındaki Öklid uzaklığını; a , küresel modelde etki uzaklığını, *Gauss* ve *üstel* modelde pratik etki uzaklığını göstermektedir. İncelenen yöresel değişkenin *teorik yarıvarioqram yapısı* matematiksel olarak belirlendikten sonra, çalışma alanı üzerinde gözlemi bulunmayan ya da eksik gözlemlili yörelerin noktasal ya da alansal değerleri *sıradan kriging (Ordinary Kriging)* tekniği (*Eşitlik 13*) ile tahmin edilebilir [5].

Sıradan Kriging, bir tür doğrusal regresyon eşitliği şeklindedir. Ancak, regresyon kat sayıları olarak bilinen ağırlık kat sayıları tahmin edilen noktadan noktaya değişim gösterir.

$$Z^*(X_1) = \sum_{i=1}^N \lambda_j \cdot Z(x_i) \quad (13)$$

Burada; λ_j ağırlık katsayılarını, $Z(X_i)$ gözlenen değerleri, $Z^*(X_1)$, X_1 noktasındaki tahmin edilen değeri gösterir. Ağırlık katsayıları, yansızlık (*Eşitlik 14*) ve minimum tahmin varyansı (*Eşitlik 16*) koşullarını sağlayacak şekilde, *kriging denklem sisteminin* (*Eşitlik 14* ve *Eşitlik 15*) çözümüyle elde edilirler:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{io}; i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

Kriging tahmin hatası, tahminin hata varyansının (*Eşitlik 16*) karekökü olup, yapılan tahminlerin güvenilirliği hakkında objektif bilgi verirler.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_j \cdot \gamma_{io} + \mu \quad (16)$$

Burada, γ_{io} , i . gözlem ile tahmin yapılan, o noktası arasındaki uzaklığa bağlı olarak elde edilen yarıvaryans değerini; μ Lagrange çarpanını; σ^2 Kriging tahmin varyansını ve n tahminde kullanılan gözlem sayısını göstermektedir [30].

2.2.3. Yarıvaryogram Modeli Uygunluk Testi

Belirlenen teorik yarıvaryogramın çalışma alanını temsil etme niteliği *çapraz doğrulama (jack-knifing)* olarak da bilinen yöntemle [31, 32] yapılabilir. Bu yöntemde *indirgenmiş hataların* ortalamasının sıfır, varyansının bir olup olmadığı kontrol edilir [27]. İndirgenmiş hataların ortalaması (*mean reduced error, MRE*) ve varyansı (*reduced variance, RVAR*) şöyle hesaplanabilir:

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma_k} \right) \quad (17)$$

$$RVAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma_k} \right)^2 \quad (18)$$

Burada, N toplam örnek sayısını, $Z(x_i)$ gözlenmiş değerleri, $Z^*(x_i)$ kriging tahminini, σ_k ise tahmin edilen değerlerin kriging standart sapmasını (kriging hata değerini) göstermektedir.

3. MODELİN UYGULAMASI

3.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Türkiye sınırları içerisinde yer alan 20 yıl ve daha büyük kayıt uzunluğuna sahip 200 adet yağış gözlem istasyonunun (*Şekil 1*) uzun yıllar aylık ortalama yağış değerleri kullanılmıştır. Herbir mevsime ait ayların uzun yıllar aylık ortalama değerleri toplanarak mevsimsel yağışlar elde edilmiştir. Mevsimsel yağış değerlerinin tanımlayıcı bazı önemli istatistikleri Minitab paket programı [33] ile hesaplanarak *Çizelge 1* de verilmiştir. *Çizelge* incelendiğinde, sonbahar ve yaz aylarında daha büyük olmakla birlikte tüm mevsimlerdeki yağış değerlerinin sağa çarpık olduğu görülmektedir. Yaz mevsimindeki standart sapma, ortalama ile yakın değerdedir. C_s katsayısı göz önüne alındığında, mevsimsel yağışların normal dağılıma uymadığı anlaşılmıştır. Ayrıca mevsimsel yağışların basıklık katsayıları (C_k) incelendiğinde hiçbir mevsimde bu katsayı değeri üçe eşit olmaması nedeniyle normal dağılıma uymadığı anlaşılmıştır.

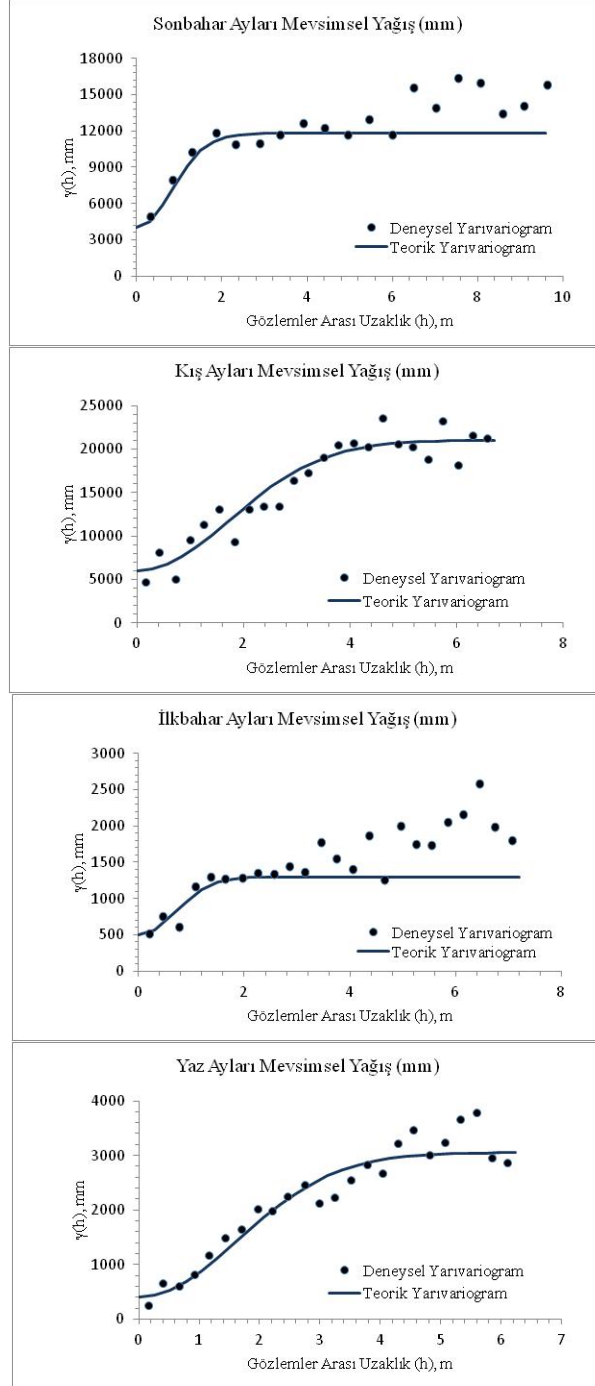
Çizelge 1. Mevsimsel Yağışların Bazı Tanımlayıcı İstatistikleri

İstatistik	Mevsimler			
	Sonbahar	Kış	İlkbahar	Yaz
Minimum (X_{\min})	43.90	42.30	80.90	1.10
Maksimum (X_{\max})	841.00	677.70	337.70	248.60
Değişim Aralığı	797.10	635.40	256.80	247.50
Ortalama (\bar{x})	155.99	234.80	167.19	56.01
Standart Sapma (S)	101.47	128.49	46.62	48.33
Çarpıklık Katsayısı (Cs)	3.45	1.10	1.29	1.76
Basıklık Katsayısı (Ck)	17.71	1.17	4.43	3.42

3.2. Jeostatistik Analiz Sonuçları

Gözlem çiftleri arasında Öklid uzaklıkları h ve bu uzaklıklara ait *deneysel yarıvaryans* değerleri $[\gamma(h)]$ her bir varyant için yönsüz olarak hesaplanmıştır. Çiftler arasındaki h uzaklığı sınıflandırılarak ortalama uzaklık (\bar{h}) ve buna karşılık gelen ortalama *deneysel yarıvaryans* ($\gamma(\bar{h})$) değerleri yeniden oluşturulmuş; ortalama ($\bar{h} - \gamma(\bar{h})$) değerleri karşılıklı olarak grafiklenerek varyansların deneysel yarıvariogramları elde edilmiştir (Şekil 2).

Mevsimlere ait hesaplanan en iyi *deneysel yarıvariogram* yapıları Çizelge 2’de verilmiştir. Saptanan *deneysel yarıvariogram* şekillerine uygun olarak dört mevsimde de *Gaussian Model* seçilmiştir. *Teorik yarıvariogram* modelinin parametreleri saptanmış, model ve parametrelerinin alanı temsil edilebilir nitelikte olup olmadığına karar vermek için *çapraz doğrulama* testi uygulanmıştır [34, 35]. *Çapraz Doğrulama* testi sonuçları Çizelge 3’de ise ayrıntılı ve Çizelge 4’te özet olarak verilmiştir. Çapraz doğrulamanın yanı sıra kriging hatalarının ortalamasının sıfır (0.0) ve varyansı en küçük veren model tercih edilmektedir (Başkan, 2004). Hataların ortalamasının sıfır olup olmadığı %5 önem düzeyine göre *normal dağılım* ile kontrol edilmiştir. Teste göre %5 önem düzeyi ve 200 adet veri için ortalamanın güven aralığı değerleri parantez içinde Çizelge 3’te verilmiştir. Çizelgeye göre hataların ortalamasının sıfır olduğu dolayısıyla kriging hatalarının eğilimi olmadığı yansız tahmin yaptığı görülmektedir. Sonuçta, modellerin alanı temsil edilebilir nitelikte olduğuna karar verilmiştir. Sonbahar ile yaz ve kış ile ilkbahar mevsimlerindeki indirgenmiş hataların varyansındaki farklılığın sebebi olarak kış ve ilkbahar dönemindeki kısa süreli bölgesel yağışlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 4-7’de verilen gözlenen minimum ve maksimum değerler ile aynı değişkenin tahmin edilen minimum ve maksimum değerleri kıyaslandığında, kriging tahmin tekniğinin yumuşatma, bir diğer ifade ile regresyon etkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca çizelgelerden görüleceği üzere tahmin edilen değerlerin standart sapması gözlenen değerlerin standart sapmasından daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum ölçümü olmayan nokta ve/veya alan için tahmin edilen değerlere güvenilebileceğini göstermektedir [35,36].



Şekil 2. Her bir Mevsime ait Deneysel ve Teorik Yarıvariogramlar

Mevsimsel yağışlar, diğer doğa olayları gibi rastgele karakter taşımaktadır. Bu yüzden, belirlenen aylık yarıvariogram modelleri kontrolsüz etki varyansı (C_0) içermiştir [37]. Bu varyansın toplam varyansa (C_0+C) oranı yaz mevsiminde % 13.1 ile minimum, ilkbahar mevsiminde % 35.7 ile maksimum düzeyde bulunmuştur (Çizelge 2). Genellikle yağışlı periyotta kontrolsüz etki varyansı artmış, kurak periyotlarda ise azalmalar göstermiştir. Aylık yarıvariogram modelleri için hesaplanan yapısal varyansların toplam varyans içindeki oranı yaz mevsiminde %86.9 ile maksimum, ilkbahar mevsiminde ise %64.3 ile minimum bulunmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 2. Mevsimsel Yağışlara ait Yarıvariogram Değerleri

Mevsimler	Model	Kontrolsüz Etki Varyansı		Yapısal Varyans		Arama Tarama Yarıçapı (km)
		C_0	%	C	%	
Sonbahar	Gaussian	4000	33.8	7800	66.2	9.5
Kış	Gaussian	6000	28.6	15000	71.4	9.5
İlkbahar	Gaussian	500	35.7	900	64.3	9.5
Yaz	Gaussian	400	13.1	2650	86.9	9.5

Çizelge 3. Dört Mevsim ayları için Çapraz Doğrulama test sonuçları

	Yağış (mm)	Gözlenen	Tahmin Edilen	Kriging Standart Sapma	Fark	İndirgenmiş Hata
Sonbahar Ayları	Minimum	43.900	63.120	67.764	-492.414	-6.146
	Q1	94.800	105.086	71.622	-18.879	-0.261
	Medyan	130.300	143.630	73.957	5.241	0.071
	Q3	176.700	179.669	76.976	21.981	0.295
	Maksimum	841.000	634.510	101.367	331.300	4.210
	Ortalama	154.178	154.476	75.299	0.298	0.005
	Std. Sapma	100.514	70.640	5.491	63.973	0.826
Kış Ayları	Minimum	42.300	71.577	82.392	-314.652	-3.687
	Q1	123.600	165.685	83.336	-37.888	-0.443
	Medyan	211.200	223.141	84.051	11.426	0.138
	Q3	309.600	283.228	85.213	55.875	0.660
	Maksimum	677.700	500.140	100.672	275.767	3.261
	Ortalama	233.866	234.611	84.921	0.745	0.010
	Std. Sapma	128.505	87.747	2.719	86.915	1.023

Çizelge 3. Dört Mevsim ayları için Çapraz Doğrulama test sonuçları (devam)

	Yağış (mm)	Gözlenen	Tahmin Edilen	Kriging Standart Sapma	Fark	İndirgenmiş Hata
İlkbahar Ayları	Minimum	80.900	100.625	27.161	-117.632	-4.097
	Q1	135.200	135.200	25.927	-15.921	-0.629
	Medyan	156.600	158.218	27.042	3.612	0.140
	Q3	185.200	184.483	28.726	18.726	0.688
	Maksimum	337.700	291.845	36.945	93.394	3.387
	Ortalama	167.190	167.768	27.398	0.578	0.014
	Std. Sapma	46.616	35.040	2.241	32.391	1.172
Yaz Ayları	Minimum	1.100	4.787	21.352	-90.160	-3.321
	Q1	21.300	24.324	21.955	-4.810	-0.203
	Medyan	44.600	44.363	22.333	1.364	0.059
	Q3	67.700	74.078	23.040	8.000	0.349
	Maksimum	244.900	202.516	30.697	70.432	3.170
	Ortalama	54.43	54.808	22.819	0.335	0.016
	Std. Sapma	46.507	40.599	1.501	19.039	0.808

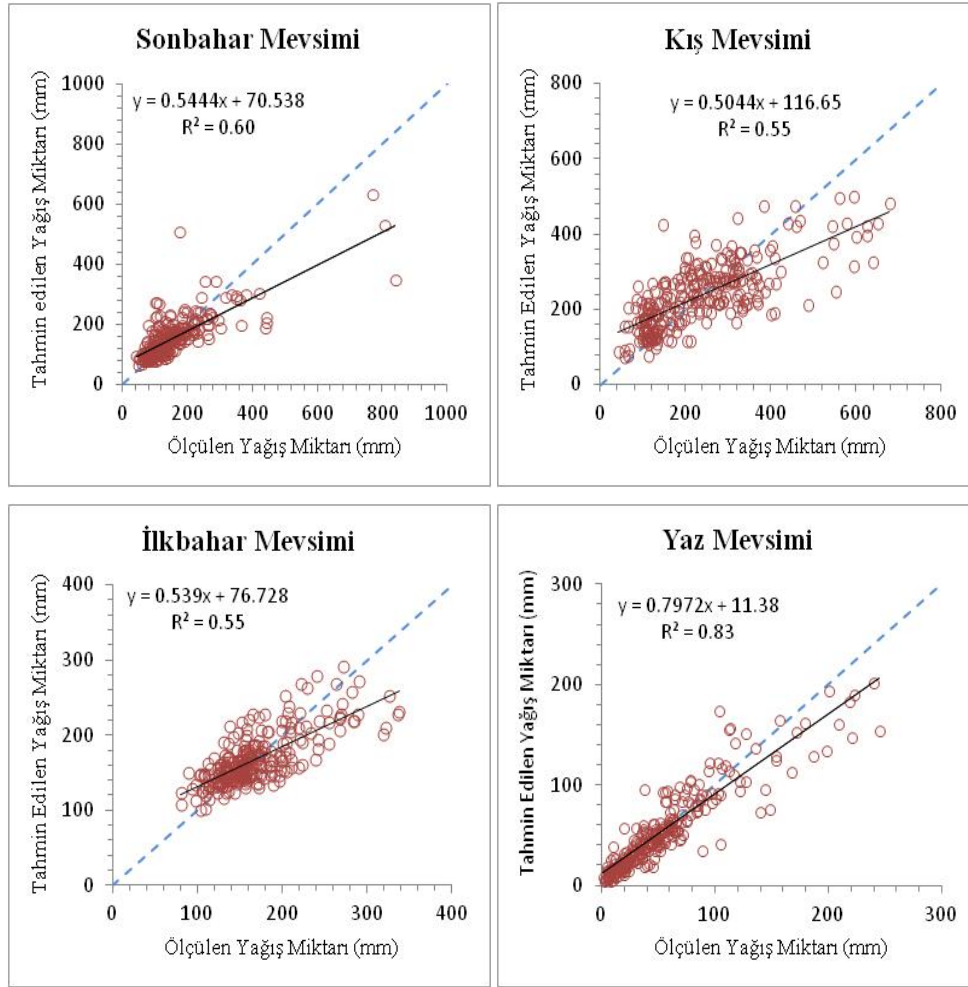
Çizelge 4. Model uygunluk testi kriterleri ve sonuçları

Mevsimler	MRE	RVAR
Sonbahar	0.005	0.826
Kış	0.010	1.023
İlkbahar	0.014	1.172
Yaz	0.016	0.808

Türkiye için gözlenen ve tahmin edilen yağış değerleri Şekil 3' de görülmektedir. Saçılma diyagramlarında görüleceği üzere kriging tahmin yöntemiyle tahmin edilen yağış değerleri, yaz mevsimi dışında diğer aylarda daha dağınık bir yapıya sahiptir. Diğer üç mevsimde de iklimsel ve coğrafi farklılıklar Türkiye geneli için yağışların heterojen bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Sonbahar, kış ve ilkbahar mevsimlerine ait saçılma diyagramlarındaki dağınıklığın bu sebeple meydana geldiği düşünülmektedir. Yaz mevsimi dışındaki yağışların görüldüğü diğer üç mevsimde, yağışların bölgelere göre farklılık göstermesi ve kriging tahmin tekniğinin yumuşatma özelliği minimum ve maksimum yağış değerlerinin düşük tahmin edilmesine neden olduğu düşünülmektedir. Bunun diğer bir nedeni olarak maksimum yağışların kıyı kesimlerde meydana gelmesi sonucu sınır etkisinin de tesiri gösterilebilir.

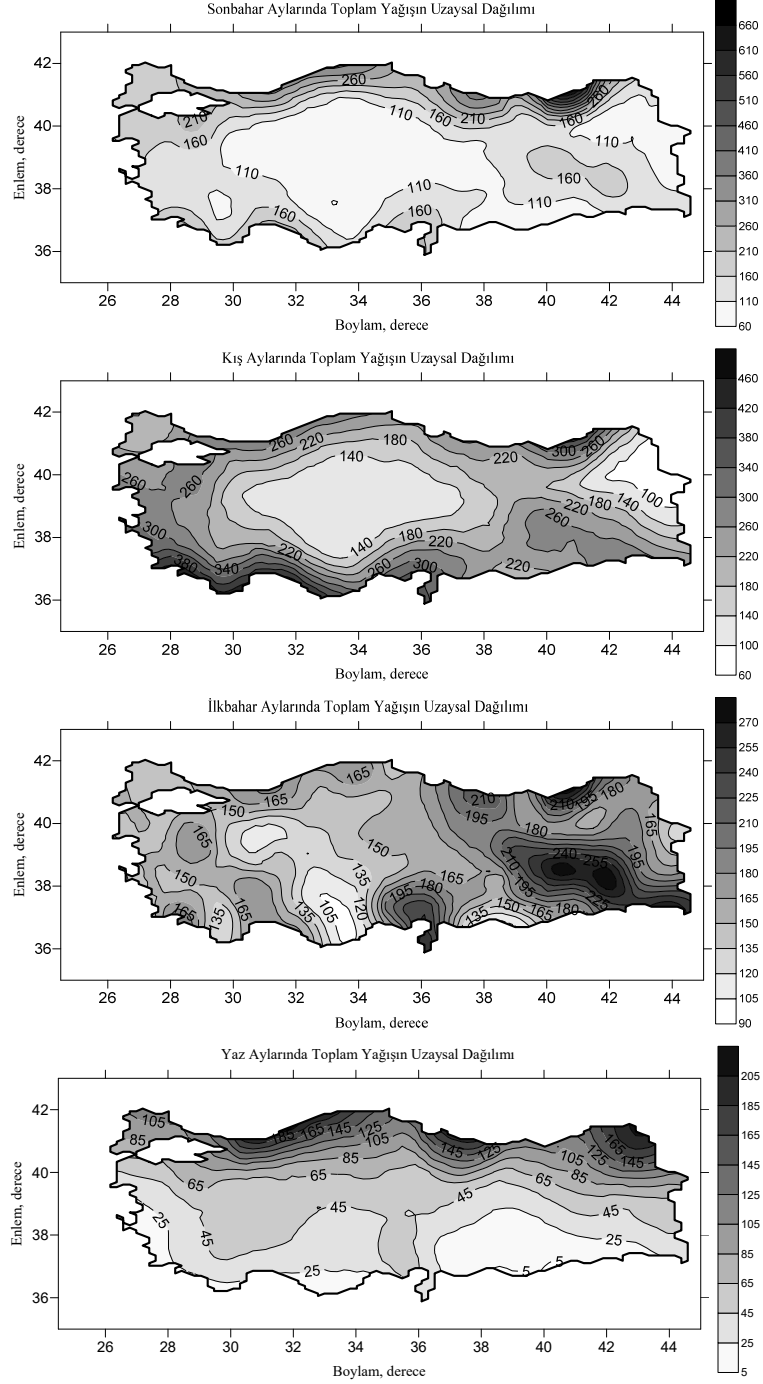
İncelenen değişkenin gözlem yapılmayan noktalardaki alacağı değerlerinin tahmin edilmesinde jeostatistik teknikler kullanılmaktadır. Bu amaçla, kriging tahmin yöntemi ile

örnekleymiş yüzeyin istenilen özellikleri tahmin edilmekte ve tahmin sırasında yarıvariogram testi aşamasında belirlenen kriging tahmin parametrelerinden faydalanılmaktadır. Kriging tahmin ve kriging hata haritaları *SURFER* paket programı [38] yardımıyla, ülkemizdeki mevsimsel yağışlarda kullanılarak, *Gaussian* tip yarıvariogram modeli yardımı ile kriging tahmin haritaları hazırlanmıştır (Şekil 4). Haritalardan da görüleceği gibi sonbahar ve kış mevsimindeki yağış benzer özellik göstermektedir. Fakat sonbahar döneminde Doğu Karadeniz bölgesi, kış döneminde ise Akdeniz bölgesi daha yağışlı geçmektedir. Bu özellikler Türkiye'nin coğrafi konumundan kaynaklanmaktadır. Kriging haritalarından görüleceği üzere denizlerden uzaklaştıkça yağış miktarları azalmaktadır. Özellikle iç Anadolu bölgesinde yağış miktarlarının minimum olduğu gözlenmektedir. İlkbahar haricindeki mevsimler bölgelere göre düzenli bir yağış dağılımı sergilerken ilkbahar mevsiminde belirli alanları etkileyen orografik ve konveksiyon yağışları kriging haritası üzerinde yüksek ve düşük yağış bölgeleri belirlemiştir.

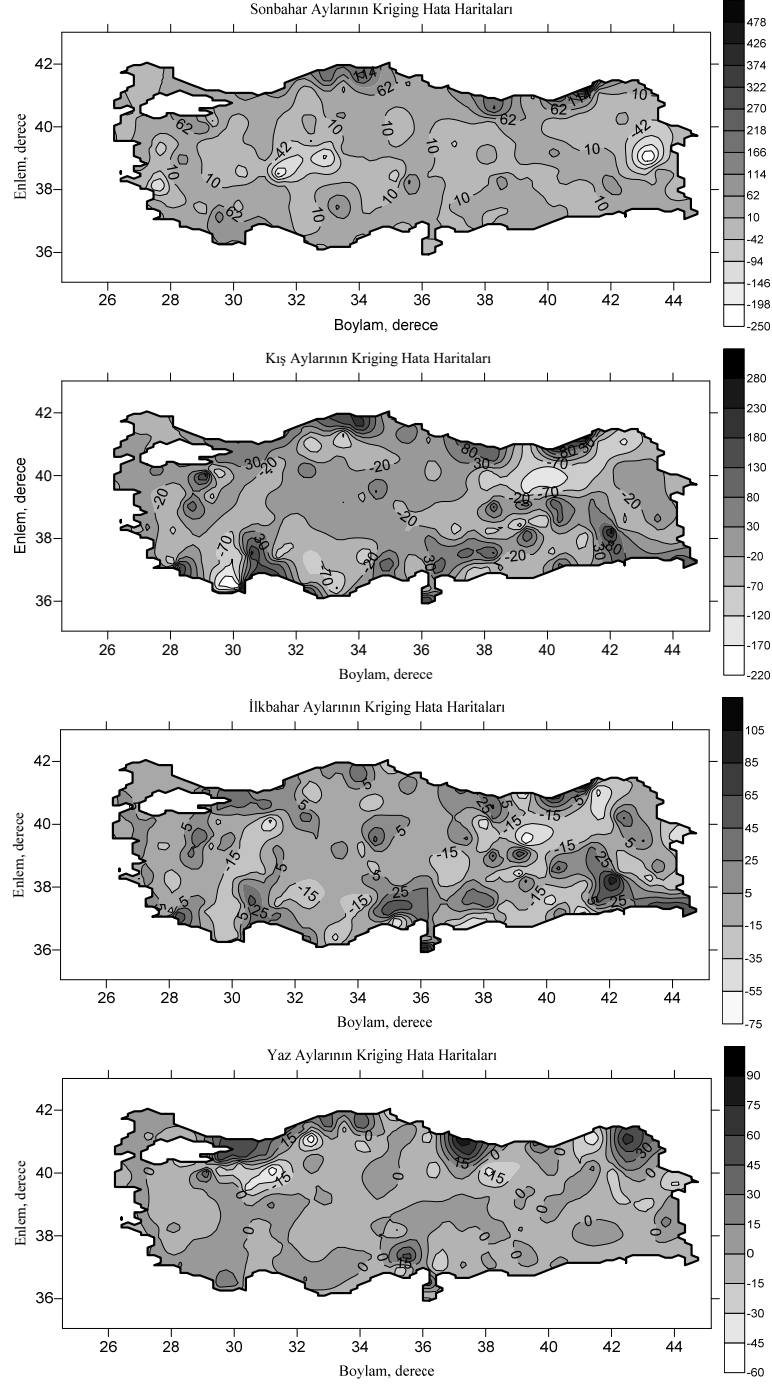


Şekil 3. Yağış Değerlerinin Karşılıklı Etkileşim Diyagramı

Mevsimsel Yağışların Jeostatistiksel Yöntemle Modellenmesi ve ...



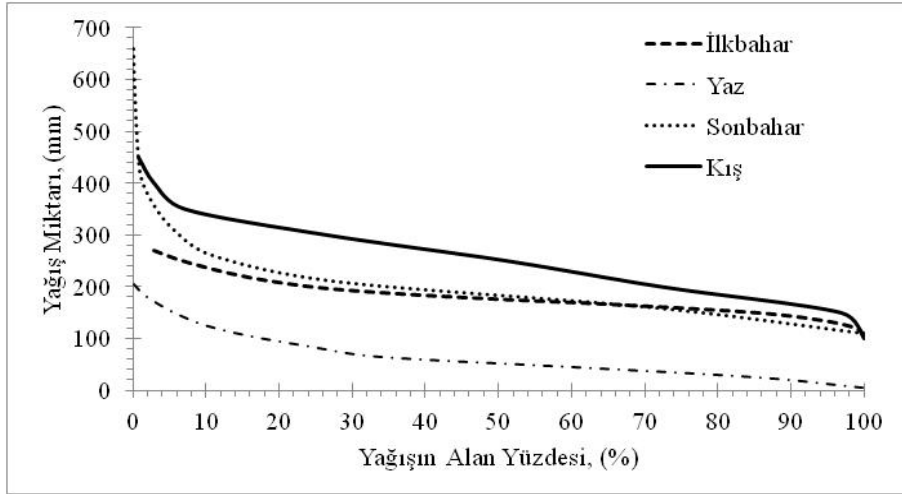
Şekil 4. Mevsimsel Yağışların Kriging Tahmin Haritaları



Şekil 5. Mevsimsel Yağış için Kriging Hata Haritaları

Şekil 5'deki kriging hata haritaları incelendiğinde iç bölgelerdeki hata değerleri düşükken, deniz kıyısı gibi çalışma alanının sınırındaki yerlerde ise yüksek hata değerleri tespit edilmiştir. Bunun nedenlerinden biri Toros ve Kuzey Anadolu dağlarının denize bakan yamaçlarındaki orografik yağışların fazla olması ve iç kesimlere yağışların geçememesi sonucu iç kesimlerdeki yağışların düşük değerlerde olması kriging tahminlerinde hataların artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Kriging hata haritalarındaki yüksek değerlerin olduğu yerler ilave gözlem istasyonlarına gereksinim duyulduğunu, istasyon sayısının bölgeyi temsil etmede yetersiz olduğu anlamına gelmektedir. Bunu yanı sıra iklimsel farklılıklar ve buna bağlı olarak yağış miktarlarındaki farklar oluşturulan kriging tahmin haritasındaki hataların artmasına neden olduğu kanısına varılmıştır.

Bu çalışmada, yarı kurak iklime sahip Türkiye coğrafyasına düşen yağış miktarlarının kapladığı alanlara göre sınıflandırılması Şekil 6' da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, ülke yüzölçümünün yaklaşık %45'inde ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde benzer ortalama yağışlar (yaklaşık 190 mm) meydana gelmiştir. Yaz mevsimi hariç diğer üç mevsimde Türkiye yüzölçümünün %50'sinde 180 mm den fazla, %100'ünde ise 100 mm' den fazla yağış gözlenmektedir. Kış mevsiminde Türkiye yüzölçümünün %72'sine, sonbahar mevsiminde %94'üne ve diğer mevsimlerde alanın tamamına 300 mm'nin altında yağış düşmektedir. Türkiye geneline baktığımızda 200 mm üzerinde yağış alan bölgeler toplam yüzölçümünün sonbahar ve ilkbahar mevsimleri için %34'ünü, kış mevsimi için ise %74'ünü oluşturmaktadır. Yaz mevsiminde ise Türkiye yüzölçümünün %90'ına yaklaşık 120 mm' nin altında yağış düşmektedir.



Şekil 6. Mevsimsel Yağışların Kapladığı Alanlar

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tabony [39], Avrupa yağış değerlendirme çalışmalarının birçoğunda Türkiye' nin datalarının eksik ve hatalı olmasından dolayı yağış değerlendirme raporlarına dâhil edilmediğini belirtmişlerdir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde (MGM) ise Türkiye' de yaklaşık 200 km aralıklarla 285 adet meteorolojik istasyonu mevcuttur. Bu istasyonların

birçoğunun 20 yıldan az verisi olması sebebiyle istatistiksel olarak değerlendirme yapmak hatalı olacaktır. Bitki sulamalarında ihtiyaç duyulan sulama sistemlerinin hesaplamalarında ise o bölgeye en yakın istasyonun geçmiş yıllara ait verileri çoğu zaman mevcut değildir. Bu sebeple, mevsimsel olarak elde dılecek haritalar ile bölgenin yaklaşık yağış miktarı hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada, mevsimsel yağışların değerlendirilmesinde jeostatistik yöntemle verilerin eğiliminin belirlenmesi ve verilerin birbirlerine göre değişiminin analizi *GEOEAS* [40] programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Jeostatistiksel analiz sonucu, çalışma alanını karakterize etmek için en uygun teorik yarı variogram modeli olarak dört mevsim için de *Gaussian* model kullanılmıştır. Mevsimsel Kriging yağış haritalardan da görüleceği üzere sonbahar ve kış mevsimlerindeki yağışlar benzer özellik göstermektedir. Fakat sonbahar döneminde Doğu Karadeniz bölgesi, kış döneminde ise Akdeniz bölgesi daha yağışlı geçmektedir. Kriging haritalarından görüleceği üzere denizlerden uzaklaştıkça yağış miktarları azalmaktadır. İlkbahar haricindeki mevsimler bölgelere göre düzenli bir yağış dağılımı sergilerken, ilkbahar mevsiminde belirli alanları etkileyen orografik ve konveksiyon yağışları kriging haritası üzerinde yüksek ve düşük yağış bölgeleri oluşturmuştur. Bu sonuçlar bölgesel değişimlerin yağış haritaları üzerinde etkisinin var olduğunu göstermektedir. Çalışma sonunda Türkiye coğrafyasına düşen yağış miktarlarının kapladığı alanlara göre sınıflandırılması yapıldığında kış mevsiminde Türkiye yüzölçümünün %72'sine, sonbahar mevsiminde %94'üne ve diğer mevsimlerde ise ülkenin tamamına 300 mm'nin altında yağış düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar Türkiye genelinde yarı kurak iklimin hâkim olduğunu göstermektedir. Türkiye geneline baktığımızda 200 mm üzerinde yağış alan bölgeler toplam yüzölçümün sonbahar ve ilkbahar mevsimleri için %34'ünü, kış mevsimi için ise %74'ünü oluşturmaktadır. Yaz mevsiminde ise Türkiye yüzölçümünün %90'ına yaklaşık 120 mm'nin altında yağış düşmektedir.

Çalışma alanının mevsimsel yağış haritaları ile hata haritaları incelendiğinde, Toros ve Kuzey Anadolu dağlarının çevresinde oluşan tahmin hataları istasyon sayısının bu bölgede sıklaştırılması gerektiği göstermektedir. Özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde kış ve ilkbahar mevsimlerinde meydana gelen tahmin hatalarının ise topografyadaki farklılıklardan ve bölgesel yağışlardan meydana geldiği kansasına varılmıştır. Bu durum yağışlar için kriging tahmin haritası yapılırken Türkiye geneli yerine iklim bölgelerine göre sınır etkilerini de dikkate alacak ayrı yağış haritaları ile daha hassas tahminler yapılabileceğini düşündürmektedir. Çalışma kullanılan yöntem ile yağış gözlem istasyonu olmayan noktalar ve bölgeler için yeterince doğru ve güvenilir tahminler yapmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu yöntem ile ölçülemeyen yağış verisi olan istasyonların eksik verileri bölgedeki diğer istasyonların değerleri de dikkate alınarak tamamlanabilecektir. İklim bölgelerine göre sınır etkilerini dikkate alarak çizilecek kriging yağış tahmin haritalarının daha hassas ve doğru sonuç vereceği düşünülmektedir. Sonraki çalışmalarda bölgesel haritalar ile Türkiye geneli için yapılan haritalar karşılaştırılabilir.

Semboller

- $\gamma(h)$: Deneysel yarı variogram
 σ^2 : Populasyon varyansı
 a : Gözlemlerin birbirinden bağımsız kabul edildiği etki uzaklığı,
 C : $C_0 + C_1$ (Eşik değer veya tepe varyansı)

$C(h)$: kovaryansı
C_l	: Yapısal ya da stokastik varyans,
C_k	: Basıklık katsayısı
C_o	: Kontrolsüz etki varyansı,
C_s	: Çarpıklık katsayısı
h	: Gözlem çiftleri arasındaki vektörel uzaklık,
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MRE	: İndirgenmiş hataların ortalaması
N	: Gözlem sayısı
n	: Değişken sayısını
RVAR	: İndirgenmiş hataların varyansı
S	: Standart sapma
x_i, x_j	: Sırasıyla i ve j gözlem noktalarındaki koordinatları
y_i	: Niceliksel değişkeni
Z	: Deneysel yarıvariogramı,
$Z(x_i)$: Gözlenen değerleri,
$z(x_i), z(x_j)$: Sırasıyla i ve j gözlem noktalarında gözlenen değerleri
$Z^*(X_l)$: X_l noktasındaki tahmin edilen değeri
$Z^*(x_i)$: Kriging tahminini,
λ_j	: Ağırlık katsayılarını,
σ_k	: Tahmin edilen değer için kriging standart sapmasını

Kaynaklar

- [1] Faures, J. M., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A, and Sorooshian, S., Impact of small-scale spatial variability on runoff modeling, *Journal of Hydrol.*, 173, 309–326, 1995.
- [2] Chaubeya, I., Haana, C.T., Grunwaldb, S., Salisburyc, J.M., Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall, *Journal of Hydrology Vol 220*, 48–61, 1999.
- [3] Schuurmans, J. M., and Bierkens M. F. P., Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol 11, 677–693, 2007.
- [4] Çetin, M., Jeostatistiksel Yöntem ile Nokta ve Alansal Yağışların Saptanması ve Stokastik Olarak Modellenmesi Örnek Havza Uygulamaları, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 1996.

- [5] [Tabios III, G.Q., Salas, J.D., A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation of Precipitation, Water Resources Bulletin, Vol 21, No.3 Pages 365-380,1985.
- [6] Önsoy, H., ve Bayram, A., Eksik Yağış Verilerinin Esas Bileşenler Yöntemiyle Tahmini, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011 İSTANBUL, 299-305.
- [7] Önsoy, H., Kömürcü, M.İ., Bayram, A., Esas Bileşenler Yöntemi ve İklim Bölgelerinin Analizi, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011 İSTANBUL, 315-326.
- [8] Önsoy, H., ve Bayram, A., MTH Yöntemi Hidrolojik Değişkenlerin Enterpolasyonu, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011 İSTANBUL,337-345.
- [9] Önsoy, H., ve Bayram, Yağış Verileri ve MTH Yöntemiyle Su Potansiyelinin Hesabı, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011 İSTANBUL,361-373.
- [10] Karahan, H., Ayvaz, M.T., and Gurarslan, G., "Determination of intensity-duration-frequency relationship by genetic algorithm: Case study GAP", Teknik Dergi, 19(2),4393-4407,2008.
- [11] Çetin, M., Özcan, H., Tülücü, K., Aşağı Seyhan ovası (ASO) IV. Merhale proje alanında toprak ve taban suyuna ilişkin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerin yersel değişimlerinin jeostatistik yöntemle araştırılması, Ç.Ü. Rektörlüğü Münferit Proje Araştırma Projesi Sonuç Raporu (Proje no:ZF/99/14), Adana, 18, 2001.
- [12] Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B.D., Wyseure, G., Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes, Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 3–4, Pages 413–421, 2006.
- [13] Basistha, A., Arya, D. S., and Goel, N. K., Spatial Distribution of Rainfall in Indian Himalayas – A case study of Uttarakhand Region, Water Resources Management, 22, 1325–1346, 2008.
- [14] Karahan, H. (2011). "Bölgesel Yağış-Şiddet Süre-Frekans Bağlılıklarının Diferansiyel Gelişim Algoritması Kullanılarak Elde Edilmesi", TÜBİTAK (108Y299), Sonuç Raporu, 2011.
- [15] Çitakoğlu, H., L-Momentler Yöntemiyle İç Anadolu'daki Standard Süreli Ekstrem Yağışların Boyut-Süre-Tekerrür Değerlerinin Bölgeselleştirilerek Haritalanması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2014.
- [16] Subyani, A.M., Geostatistical study of annual and seasonal mean rainfall patterns in southwest Saudi Arabia, Hydrological Sciences, 49(5), 803-817,2004.
- [17] van de Beek, C. Z., Leijnse, H., Torfs, P. J. J. F., and Uijlenhoet, R., Climatology of daily rainfall semi-variance in The Netherlands, Hydrology and Earth System Sciences, 15(1), 171-183, 2011.

- [18] Çobaner, M., Çakar, A., Çetin, M., Yurtal, R., Göksu Deltasında Bazı Yeraltı Suyu Kalite Ögelerinin Probabilistik ve Jeostatistik Yöntemlerle İrdelenmesi, İMO Teknik Dergi, yazı 341, 5259-5283, 2011.
- [19] Burgess, T. M., and Webster, R., Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties I, The Semivariogram and Punctual Kriging. Journal of Soil Science, 31(3), 315–331, 1980.
- [20] Olea, R. A., Measuring Spatial Dependence With Semivariograms. Kansas Geological Survey, Series on Spatial Analysis, No. 3, Lawrence, Kansas, 1977.
- [21] Kırdı, C.; Kanber, R., Toprakların Kimi Fiziksel Özelliklerinde Gözlenen Uzaklık Boyutuna Bağımlı Değişkenlik Tavrı. Yayınlanmamış, Ç.Ü. Ziraat Fakültesi, Kültürteknik Bölümü, Adana, 1983.
- [22] Kutilek, M., and Nielsen, D. R., Soil Hydrology. GeoEcology Textbook, Catena Verlag, Germany, 1994.
- [23] Olea, R. A., Optimum Mapping Techniques Using Regionalized Variable Theory, Kansas Geological Survey, Series on Spatial Analysis, No. 2, Lawrence, Kansas, 1975.
- [24] Vauclin, M., Vieira, S. R., Vachaud, G., and Nielsen, D. R., The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations. Soil Sci. Soc. Am. J., 47, 175–184, 1983.
- [25] Kitanidis, P.K., Geostatistics. In the Handbook of Hydrology by Maidment, D.R., (Editor in Chief), McGraw-Hill, Inc., New York, Chapter 20, 1993.
- [26] Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M., Applied Geostatistics. Oxford University Press, Inc., USA, 1989.
- [27] Journel, A. G. and Huijbregts, C. H. J., Mining Geostatistics. Academic Press, London, 1991.
- [28] Willerding, M. F., and Engelsohn, H. S., Mathematics : The Alphabet of Science, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1977.
- [29] Clark, I., Practical Geostatistics. Department of Mineral Resources Engineering, Royal School of Mines, Imperial College of Science and Technology, London, U.K., 1979.
- [30] Bayraktar, B., Zemin Özelliklerinin Coğrafi Bilgi Sistemi Ortamında Mesafenin Tersine ve Kriging Yöntemleriyle Kestirimi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tez, Eskişehir, 2007.
- [31] Vieira, S.R., Hatfield, J.L., Nielsen, D.R., and Biggar, J.W., Geostatistical Theory and Application to Variability of Some Agronomical Properties, Hilgardia, 51, 3, 1–75, Davis California, 1983.
- [32] Deutsch, C.V. and Journel, A.G., Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, Inc., New York, 1992.
- [33] Minitab 15, Minitab istatistik paket programı, Minitab, Inc, <http://www.minitab.com>, 2006.

- [34] Vieira, S.R., Hatfield, J.L., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W.1983. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51(3); 1-75.
- [35] Başkan, O., Gölbaşı yöresi topraklarının mühendislik, fiziksel özellik ilişkilerinde jeostatistik uygulaması, Doktora tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [36] Trangmar, B.B., Yost, R.J. and Wehara, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, Vol 38;65-91.
- [37] Çetin, M. ve Tülücü, K., Doğu Akdeniz Bölgesinde Aylık Yağışların Yersel Değişimlerinin Jeostatistik Yöntemle İncelenmesi, *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, TÜBİTAK, 279-288, 1998.
- [38] SURFER, Surfer for Windows Version 8.02. Golden Software, Inc., <http://www.goldensoftware.com>, 2002.
- [39] Tabony RC. 1981. A principal component and spectral analysis of European rainfall. *Journal of Climatology* 1: 283–294.
- [40] GEOEAS, Geostatistical Environmental Assessment Software: Kriging Software. E. Englund (U.S. EPA) and Allen Sparks (Computer Sciences Corp.), 1989.

Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Enterkonnekte Sistemde PSS/E ile Modellenmesi

Wind Power Plants in Interconnected System Modelling with PSS/E

Halil İbrahim AYDINÖZ¹, Orhan EKREN²

¹ Batı Akdeniz Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)
halil.ibrahim.aydinoz@gmail.com

² Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji ABD
Ege Üniversitesi
orhanekren@gmail.com

Özet

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinin, elektrik güç sistemindeki payı diğer kaynaklara göre daha hızlı artmaktadır. Bu durum rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye bağlantısında elektrik güç sistemine olan etkilerinin incelenmesini gerektirmektedir. Bilindiği üzere rüzgar enerjisinin şebekeye bağlantı noktasında, enerji kalitesi ve şebeke etkileşimi konusunda bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi rüzgarın kesikli ve değişken güç üreten yapısı nedeniyle, rüzgar enerjisi santrallerinin şebeke bağlantı noktasında bozucu etkilere sebep olmasıdır. Bu bozucu etkiler özellikle sistemin zayıf olduğu yerlerde türbinlerin şebekeye bağlanmasında kısıtlayıcı etkilere neden olmaktadır. Çünkü iletim sisteminde kısa devre akımları, güçleri ve gerilim seviyelerinin belirli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Bu çalışmada, Batı Akdeniz Bölgesinde yer alan Dinar Rüzgar Enerjisi Santralinin (RES) PSS/E programı ile modellenmesi yapılarak kısa devre akımları analizi ve yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler kısa devre akımları, güçleri ve gerilim seviyelerinin uluslararası standartlar, TEİAŞ ve EPDK açısından gereklilikleri ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: rüzgar enerjisi, kısa devre analizi, yük akış analizi, pss/e, enterkonnekte sistem

Abstract

Electricity production from wind energy as a renewable source has been increasing more rapidly than the other sources. In this case effects on the electric power system of wind energy system connection to the electricity network should be investigated. As it is known that, connection point of wind energy system to the electricity network has some problem such as energy quality and electricity network interaction. This is due to the fluctuation on wind speed and variable wind power generation. These disturbance s restrict wind turbine connection to the electricity network especially at the weak parts of the electricity network. Because short-circuit currents, powers and voltage levels in the transmission system must be within a certain limits. In this study, a case wind power plant (WPP) located in the Western Mediterranean Region of Dinar has been modelled by using PSS/E software also analysis of short circuit currents and

load flow analysis have been performed. The analysis showed requirements for the short circuit currents, powers and voltage levels according to the international standards, TEİAŞ and EPDK s.

Keywords: wind power, short circuit analysis, load flow analysis, pss/e, interconnected systems

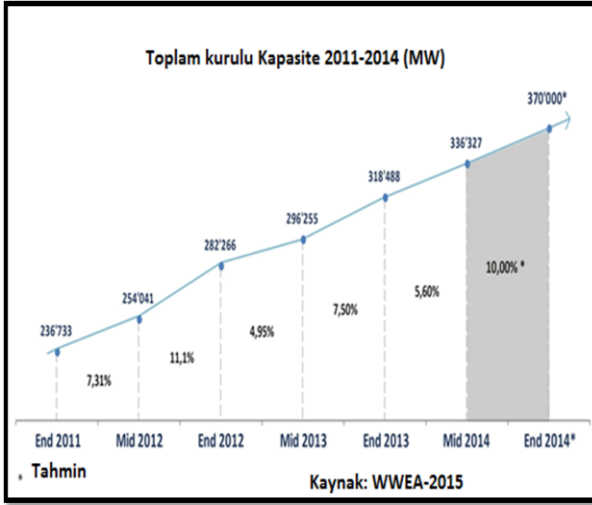
1. Giriş

Rüzgar gücünden yararlanmanın tarihi beş bin yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Rüzgardan faydalanma insanlık tarihinin önemli bir bölümünde sadece mekanik güç elde etmek amaçlı olmuştur. Mezopotamya'da sulama amaçlı ilk uygulamaları MÖ 2800'lerde Babil'de yapılmıştır. Yel değirmenlerine ise ilk olarak İskenderiye'de rastlanılmıştır. Türklerin ve Perslerin 7.yy'da yel değirmeni kullandıkları tarih kitaplarında yer almıştır. Avrupa ülkelerinde ise 12.yy'da yel değirmenleri kullanılmaya başlanmıştır [1,2,3]. 20. yüzyılın başlarına kadar rüzgardan, su pompalamak (su değirmenleri) veya tanecik öğütme (yel değirmenleri) için gerekli mekanik gücü sağlamak amacıyla yararlanılıyordu. Sanayi devrimine bağlı olarak endüstriyel ilerlemenin başlangıcı ile fosil yakıt (petrol, kömür vb) tüketiminin ve elektrik üretiminin büyük oranlara ulaşması ve yüksek verimin elde edilmesi rüzgar enerjisini bir kenara atmıştır.

Günümüzde gerçekleşmekte olan teknolojik, ekonomik ve toplumsal gelişmelere paralel olarak, ihtiyaç duyulan elektrik enerjinin kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve ekonomik koşullarda, çevresel etkileri dikkate alınarak üretilmesi zorunluluğu vardır. Fosil kaynaklı yakıtların sınırlı ömürleri ve çevre kirliliğine yol açmaları alternatif enerji kaynakları üzerinde yeni arayışları kaçınılmaz hale getirmektedir. Çevre kirliliği açısından fosil yakıtlara en büyük alternatif, yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda rüzgar, güneş, biyokütle, ve jeotermal gibi doğal kaynaklarla elektrik enerjisi üretiminde önemli adımlar atılmaktadır.

Üretim kapasitesi açısından dünyada en fazla büyüyen enerji kaynağı rüzgar enerjisi olup, 2011 yılı sonunda 236.733 MW olan dünya rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu gücü, 2014 yılı sonunda 2011 yılına göre 1,5 kat artarak 370.000 MW olmuştur. 2013 yılı ile 2014 yılı arasında bir yıllık süreçte

dünya genelinde rüzgar enerjisi santrallerine 17.613 MW daha yeni kapasite eklenmiştir Şekil 1’de yıllara göre kurulu güç miktarı gösterilmiştir[5].



Şekil 1: 2011-2014 yılları arası Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü[5]

Rüzgar enerjisi, bu hızla gelişmeye devam eder ve daha fazla destek politikaları uygulanırsa, 2020 yılında dünya kurulu gücünün 1.500.000 MW’ı aşması mümkün olabilecektir [5]. Bu kurulu gücün ülkelere göre dağılımı Şekil 2’de gösterilmiştir.

Position 2013	Country/Region	Total capacity end 2014 ** [MW]	Added capacity 2014 *** [MW]	Growth rate 2014 [%]
1	China	114'763	23'350,0	25,7
2	USA	65'879	4'854,0	7,8
3	Germany	40'468	5'808,0	16,8
4	Spain	22'987	27,5	0,1
5	India	22'465	2'315,1	11,5
6	United Kingdom	11'998	1'467,0	13,9
7	Canada	9'694	1'871,0	25,9
8	France	9'296	1'042,0	12,6
9	Italy	8'663	107,5	1,3
10	Brazil	6'182	2'783,0	81,9
11	Sweden	5'425	1'050,0	21,4
12	Denmark *	4'850	78,0	1,6
	Rest of the World	47'300	7'000 (estimated)	16,0
	Total	370'000	51'753	16,2

* by november 2014
 ** Includes all installed wind capacity, connected and not connected to the grid.
 *** Includes the net capacity added during the year 2014.

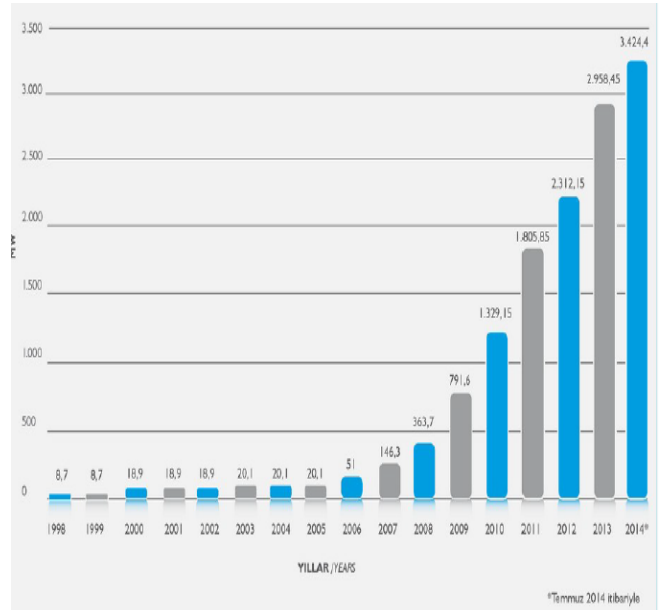
Kaynak: WWEA

Şekil 2: Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücünün ülkelere göre dağılımı[5]

Avrupa Birliği Komisyonu, 2007 yılında “Yenilenebilir Enerji Yol Haritası” adlı raporunda yenilenebilir enerjinin var olan toplam enerjideki payının 2020 yılında %20 olması hedefini ortaya koymuştur. Ayrıca, toplam elektrik tüketiminin yaklaşık % 35’ ini, ısı ihtiyacının % 25’ ini ve ulaşımın % 10’ unu yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı ana hedef olarak belirlemiştir [6].

Türkiye, rüzgar potansiyeli bakımından oldukça avantajlı bir ülkedir. Türkiye’de rüzgar enerjisinden elektrik üretimi konusunda ilk sistem 1985 yılında Danimarka’dan ithal edilip İzmir-Çeşme Altınyunus Turistik tesislerinde kurulan 55 kW gücündeki rüzgar türbinidir. Üç kanatlı yatay eksenli bu türbinden üretilen elektrik enerjisi adı geçen tesiste tüketilmektedir [7].

Türkiye’de halen şebeke bağlantılı yüz onbir (111) rüzgar santrali vardır. Bu santrallerin toplam gücü 3424,24 MW’tır. Türkiye’de 1998-2014 yılları arası kurulu gücü Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilden gösterildiği gibi Türkiye 1998 yılında kurulu güç olan 8,7 MW rüzgar gücü 2014 yılı itibariyle 370 kat artarak 3424 MW seviyesine gelmiştir[8]. Kasım 2015 tarihi itibariyle önceki yıla göre 800 MW kapasite artışı ile Türkiye’deki kurulu güç kapasitesi 4280 MW seviyesine gelmiştir.



Şekil 3: 1998-2014 yılları arası Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücü[8]

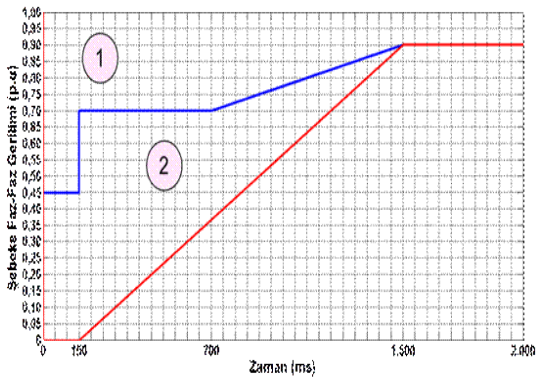
Dünya’da ve Türkiye’de hızla artan güç miktarı kapasitesiyle rüzgar enerjisi elektrik şebekesine entegre olmaktadır. Ülkemizde, iletim sisteminin güvenilir ve düşük maliyetli olarak işletilmesinde ve enerji kalitesi ile sistem kararlılığının sağlanmasında uygulanacak standartlara ilişkin usul ve esasları belirlemek amacıyla Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği mevcuttur. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK), rüzgar santrallerinin, hidrolik ve termik santrallerden farklı bir karakteristiğe sahip olması nedeniyle rüzgar santrallerinin şebeke bağlantısı sırasında uyması gereken kriterleri ayrıca belirtmektedir[9]. Bu amaçla bu çalışmada, Batı Akdeniz Bölgesinde bulunan Dinar Res’i elektrik güç kalitesi yönünden inceleme amaçlı örnek santral olarak belirlenmiştir. Santralin PSS/E programı ile modellenmesi yapılarak yük akış ve kısa devre akım analizleri incelenmiştir.

2. Rüzgar Enerjisi Santralleri Enerji Kalitesi ve İletim Şebekesine Bağlantı Esasları

Büyük güçlerdeki rüzgâr gücünün şebekeye entegrasyonu çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Güç sistemleri ve onların işletilmeleri senkron jeneratörlü konvansiyonel güç santrallerine göre geliştirilmiştir. Rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallerden farklıdır. Rüzgârın güç miktarı önemli olup şebeke performansını ve kararlılığını etkiler. Bu nedenle iletim sistem operatörleri rüzgâr santrallerinin hatta bağlanabilmesi için uyulması gereken çeşitli kurallar koyarlar.

Rüzgar santrallerinin arıza sonrası sisteme yapması gereken katkı, aktif güç kontrolü, reaktif güç kontrolü, frekans tepkisi vs. gibi kriterler olup, Elektrik Piyasa Şebeke Yönetmeliği EK- 18' de detaylı bir şekilde yer almaktadır. Bu kriterler, iletim sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerine uygulanır.

İletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin Şekil 4'de verilen 1 numaralı ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümlerinde rüzgar türbinleri şebekeye bağlı kalması zorunludur.



Şekil 4: İletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz gerilimi

Arıza sırasında gerilim düşümünün 1 numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgar türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal aktif gücünün en az %20'si oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır [17].

Arıza sırasında gerilim düşümünün 2 numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgar türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal aktif gücünün en az %5'i oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır [17].

Şebeke bağlantı noktasında meydana gelen $\pm 10\%$ 'a kadar olan nominal işletme gerilimi dalgalanmaları (0,9pu – 1,1pu) normal işletme koşulları olup, rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri belirtilen esaslara uymalıdır [17].

EPDK'nın rüzgar santrallerinin kurulum güçlerini sınırlayan bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'ini aşmaması koşulu, her bağlantı noktasının karakteristiğine göre artırılabilir. Ayrıca, bir rüzgar santralinin şebekeyle en uygun şekilde enterekte olabilmesi için, istenmeyen gerilim

değişimlerinin önlenmesi, mevcut şebeke elemanlarının kısa devre akım limitlerini ve ısı dayanım kapasitelerini zorlamaması gerekir. Buna ek olarak, fliker ve harmoniğin kabul edilebilir sınırlar içinde olması, anahtarlama ve anlık devreye girme gibi geçici durumlarda şebeke kararlılığının sınır değerler içinde kalması gereklidir [10].

Enerji kalite parametrelerinden biri olan rüzgar santrallerinin kısa devre arızası durumunda vereceği tepkiler, sistem kararlılığı için oldukça önemlidir. Rüzgar santrallerinin sistem kararlılığına gerekli desteği sağlayabilmeleri için kısa devre arızası durumunda, arıza giderilene kadar belirli bir süre boyunca sistemden ayrılmaması gerekmektedir. Rüzgar santrali kurulu gücünün sürekli artması, konvansiyonel santraller ile oluşturulan yedek generatörlerin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Bu sorunu gidermek için generatörlerin teknik yetenekleri artırılmalı, yedek konvansiyonel santrallerin çok daha hızlı ve yüksek kapasitede (kısa tepki süreli ve üretim düzeyi yüksek) devreye alınmaları sağlanmalıdır. Üretim dalgalanmalarını dengelemek ve yük eğrisini izlemek amacıyla yeterli yedek konvansiyonel santral bulundurulmalıdır [11].

Rüzgar enerjisi santrallerinin iletim şebekesine bağlanma şartları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İletim şebekesine bağlanacak bir rüzgar santrali, ya en yakın TEİAŞ trafo merkezine çekilecek bir iletim hattı ile, ya da en yakın iletim hattına girdi çıktı yaparak şebekeye bağlanabilir.
- İletim şebekesişn gerilim seviyesi 154 veya 380 kV dur. Bu gerilimdeki trafo merkezlerinin minimum kısa devre güçleri 300 – 400 MVA'dan başlamakta, 10.000 MVA'e kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük güçteki rüzgar santralleri ancak iletim şebekesine bağlanabilir.
- Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgar çiftliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacakları trafo merkezinin gerilim seviyesinde seçilmektedir. Bu durumda santral çıkışına ilave bir yükseltici (veya düşürücü) trafo tesis maliyeti olmamaktadır.
- İletim şebekesine bağlanacak rüzgar santrallerinde ise gerilim seviyesi olarak en ekonomik dağıtım gerilim seviyesi seçilebilir. Bu durumda, santral çıkışında kullanılacak yükseltici trafonun, ülkemizde kullanılan standartlardan farklı olması durumunda, yedekleme sorunu ortaya çıkabilir.
- Rüzgar santrallerinin iletim şebekesine bağlanmasının diğer bir şekli ise, kısa devre gücünün oldukça yüksek olduğu 380 kV merkeze bağlanmasıdır. Ülkemizdeki 380 kV merkezlerin minimum kısa devre gücü genelde 5000 MVA' nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgar santrali, şebekede probleme sebep olmadan bağlanabilir[12].

Burada önemli olan, çok sayıda trafo maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgar santrallerinin bağlanacağı bir kirli bara tesis ederek en ekonomik çözümün bulunmasıdır.

3. Dinar Res'in Dinamik Olarak PSS/E ile Modellenmesi

Bu çalışmada PSS/E programı ile yük akış analizi ve kısa devre analizi yapılmıştır. PSS/E programı dünyadaki bir çok elektrik şirketi yanında TEİAŞ tarafından da iletim sisteminin planlaması ve işletilmesi için yapılan etüt çalışmalarında kullanılmaktadır. PSS/E programıyla iletim sisteminin ve üretim performansının etütleriyle ilgili olarak sürekli durum ve dinamik analizleri gerçekleştirilmek mümkündür. Bunlar;

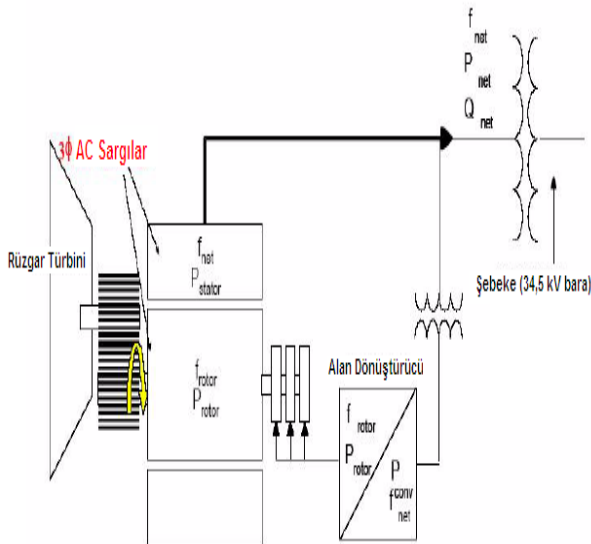
- Yük akış analizi
- Kısa devre analizi
- N-1 kriteri analizi
- Dengeli ve dengesiz arıza analizi
- PV/QV analizleri
- Dinamik simülasyon

olarak sıralanabilir[13].

Kullanımda olan 4 tip rüzgar türbini (RT) modeli:

- RT1-Doğrudan bağlı (sabit hızlı) asenkron generatörler
- RT2-Kademeli değişen rüzgar türbinleri (harici rotor direnç kontrollü)
- RT3-Çift beslemeli asenkron generatör
- RT4-Tam kapasiteli dönüştürücü rüzgar generatör türbini

Söz konusu sınıflama esas alınarak PSS/E programının güncel versiyonunda (ver.33), piyasada en yaygın kullanılan rotor bağlantı uçlarına bağlı güç dönüştürücü ile aktif gücün kontrol edildiği çift beslemeli asenkron generatör kullanılarak bir rüzgar türbininin performansını simüle etmek ve iletim/dağıtım sisteminde RES bağlantısının gerçekleştirilmesi için RT3(çift beslemeli asenkron generatör) PSS/E rüzgar türbin modeli geliştirilmiştir. PSS/E programında geliştirilen rüzgar modeli genel şeması Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5: Rotor bağlantı uçlarına bağlı güç dönüştürücü ile aktif gücün kontrol edildiği çift beslemeli asenkron generatör

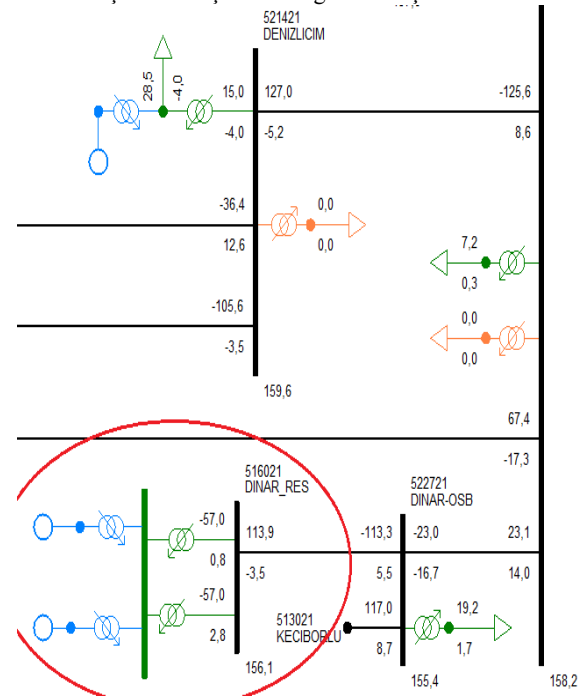
Bu model, elektrik iletim ve dağıtım sisteminde RES’lerin bağlantısıyla ilgili çalışmalarda kullanılmak için geliştirilmiş olup bu çalışmada yük akış ve kısa devre akım analizlerinde kullanılmıştır.

3.1. Dinar Res’in Yük Akış Analizleri

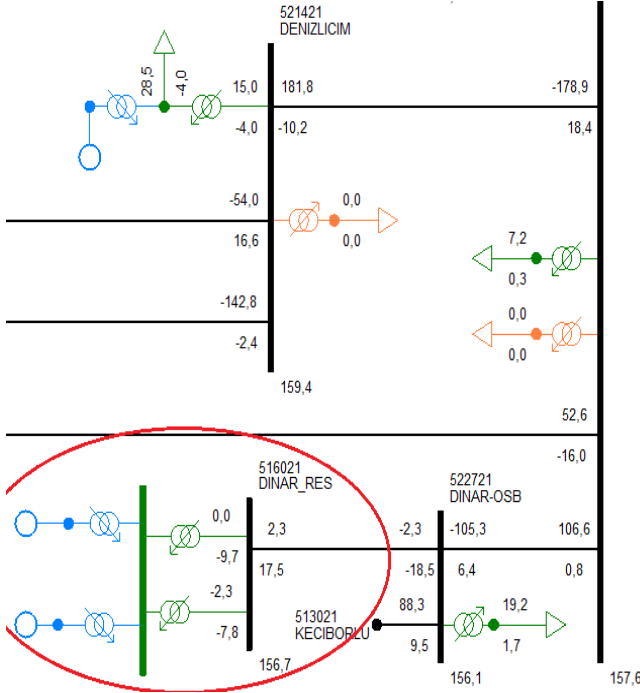
Mevcut çalışmada esas alınan Dinar RES ve Türkiye’de kullanılan tüm RES’ler (ilk kurulan birkaç tane hariç) çift beslemeli asenkron generatör tipinde olduğundan analizlerde bu model kullanılmıştır.

Dinar RES 50x2,3 olmak üzere toplamda 50 ünitenin olduğu 115 MW kurulu güce sahip bir rüzgar enerjisi santralidir. Üretilen enerji 154 kV enterkonnekte sisteme verilmektedir. Santral 14,8 km 795 MCM kesitli 154 kV tek hatla Dinar OSB TM’ye bağlıdır. Santralde iki adet 154/33,6 kV 50/62,5 MVA trafo bulunmaktadır.

Dinar RES’in 50 adet 2,3 MW generatörden oluşan rüzgar parkı PSS/E’de modellenmiştir. Buna bağlı Dinar RES’in 115 MW (anma gücü) ve 2,3 MW üretim yaptığı durumlara ilişkin olarak Newton-Raphson yöntemine göre yük akış analizleri yapılarak sistem bağlantı noktasında sisteme verilen aktif güç ve reaktif güç değerleri belirlenmiştir. Yapılan yük akış analizleri Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 6: Dinar RES ‘in 115 MW üretim yaptığı durumu



Şekil 7: Dinar RES'in 2,3 MW üretim yaptığı durumu

Yapılan yük akış analizlerinde Dinar RES tam yükte iken radyal bağlı olduğu Dinar OSB hattına tam yükte 113 MW aktif güç göndermekte 3,5 MVAR (endüktif) reaktif yük çekmektedir. Tek grup çalışma durumunda yapılan analizde 2,3 MW aktif güç ve 17,5 MVAR(kapasitif) reaktif yük göndermektedir.

3.2. Dinar Res'in Kısa Devre Akım Analizi

Enerji sisteminde yıldırım düşmesi, açma kapama olayları, mekanik hatalar, buz yükü, toprak kayması, deprem, kuş, haşarat, nem, kir ve benzer sebebi ile meydana gelen aşırı gerilimler, üzerinde gerilim bulunan sistem parçalarını elektriksel olarak zorlar. Zorlama, gerilim yalıtım seviyesini aşarsa kısa devre oluşur. Kısa devre akımının değeri, hata noktasından sistemi besleyen kaynağa doğru bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer devresi tarafından belirlenerek, hesaplanır [14].

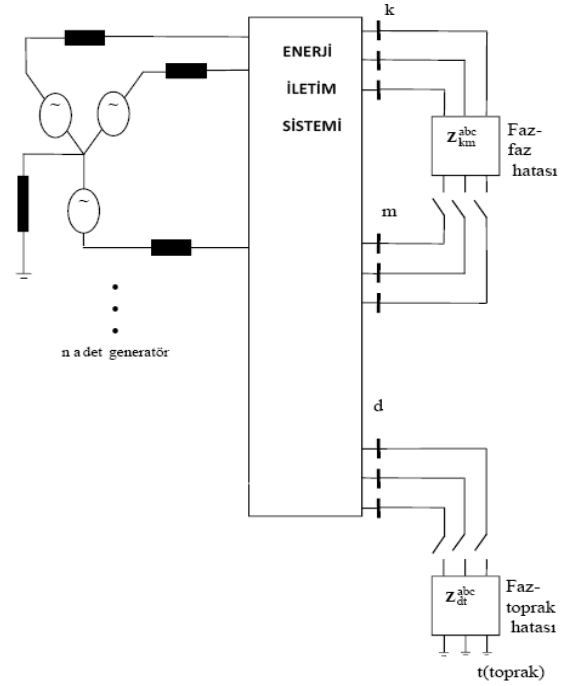
Kısa devre olayları dengeli ve dengesiz kısa devre olarak iki şekilde incelenir. Hata öncesi hat akımları birbirine eşit olan bir sistemde, hatadan sonra da hat akımları genlik olarak birbirlerine eşit değer alıyorsa, oluşan hata türü dengeli kısa devre olarak isimlendirilir [15].

Hata esnasında sistemde dolaşan akımların fazlara göre genliklerinin değişmemesi nedeniyle simetrik hata olarak isimlendirilirken, hata akımlarının genliklerinin fazlara göre değişenleri ise simetrik olmayan olarak adlandırılmaktadır. Simetrik olmayan hatanın incelenmesinde ise dengesiz akım ve gerilim değerlerinden dolayı, sisteme ilişkin ters ve sıfır bileşen devre bara empedans ve admitans matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır [16].

Büyük boyutlu veya çok devreli enerji sistemlerine ilişkin kısa devre hesaplamalarında sistemin doğru, ters ve sıfır bara

empedans ile bara admitans matrislerinin oluşturulması gerekir. Bara empedans matrisi $[Z_{\text{bara}}]$ oluşturulması için ise iki ayrı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşımda tüm sisteme ilişkin bara admitans matrisi $[Y_{\text{bara}}]$ oluşturularak, bunun tersi $[Z_{\text{bara}}]$ elde edilmektedir. İkincisinde ise adım adım $[Z_{\text{bara}}]$ oluşturularak, $[Y_{\text{bara}}]$ matrisine gerek duyulmamaktadır [16].

Dengeli hatalarda sisteme ilişkin empedansların doğru bileşen değeri kullanılırken, Şekil 8'de enerji sistemine ilişkin genel hata modeli gösterimi bulunmaktadır. Hata öncesi sistem dengeli olduğu için doğru, ters ve sıfır bileşen devreler arasında kuplaj bulunmamakta olup, dolayısıyla bu devrelere ilişkin I_1 , I_2 ve I_0 akımları da sıfırdır [16].



Şekil 8: Enerji sistemi hata modeli gösterimi

Söz konusu santralde iki adet 154/33,6 kV 50/62,5 MVA trafo bulunmakta olup radyal olarak bağlı olduğu trafo merkezinin 154 kV ve 31,5 kV baralarının kısa devre akım analizi yapılmıştır.

Dinar Res ve Dinar OSB için yapılan en ağır koşul olan 3 faz kısa devre analizini Dinar RES anma gücü olan 115 MW ve servisi harici (üretim yapılmadığı zamanda) PSS/E programında *sequence* data kullanılarak analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarının program çıktıları Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.

X----- BUS -----X X----- TO BUS -----XCKT		THREE PHASE FAULT	
		/I+/ AN(I+)	
516021 [DINAR_RES 154.00]		AMP	3452.3 -72.96
516021 [DINAR_RES 154.00]	516041 [DINAR_RES1 33.600] 1	OUT AMP	3220.0 -75.99
516021 [DINAR_RES 154.00]	516042 [DINAR_RES2 33.600] 1	OUT AMP	3227.4 -76.01
516021 [DINAR_RES 154.00]	522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	578.3 -36.72
516041 [DINAR_RES1 33.600]		AMP	6311.4 -70.99
516041 [DINAR_RES1 33.600]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	1645.4 -37.78
516041 [DINAR_RES1 33.600]	516061 [G-DINAR_RES 0.6600] 1	OUT AMP	5016.4 -81.34
516042 [DINAR_RES2 33.600]		AMP	6281.5 -70.93
516042 [DINAR_RES2 33.600]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	1616.7 -36.69
516042 [DINAR_RES2 33.600]	516062 [G-DINAR_RES 0.6600] 1	OUT AMP	5028.0 -81.36
522721 [DINAR-OSB 154.00]		AMP	4171.5 -74.07
522721 [DINAR-OSB 154.00]	513021 [KECIBORLU 154.00] 1	OUT AMP	3058.4 -67.94
522721 [DINAR-OSB 154.00]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	3740.7 -79.35
522721 [DINAR-OSB 154.00]	521621 [BOZKURT 154.00] 1	OUT AMP	1599.9 -73.71
522721 [DINAR-OSB 154.00]	522741 [DINAR-OSB 31.500] 1	OUT AMP	4171.5 -74.07
522741 [DINAR-OSB 31.500]		AMP	5634.1 -78.77
522741 [DINAR-OSB 31.500]	522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	0.0 0.00

Şekil 9: Dinar RES 115 MW üretim yaptığı durumda Dinar RES ve Dinsar OSB TM 3 faz kısa devre akımları sonuçları

X----- BUS -----X X----- TO BUS -----XCKT		THREE PHASE FAULT	
		/I+/ AN(I+)	
516021 [DINAR_RES 154.00]		AMP	3007.1 -82.85
516021 [DINAR_RES 154.00]	516041 [DINAR_RES1 33.600] 1	OUT AMP	3007.1 -82.85
516021 [DINAR_RES 154.00]	516042 [DINAR_RES2 33.600] 1	OUT AMP	3007.1 -82.85
516021 [DINAR_RES 154.00]	522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	0.0 0.00
516041 [DINAR_RES1 33.600]		AMP	4889.4 -88.61
516041 [DINAR_RES1 33.600]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	0.0 0.00
516042 [DINAR_RES2 33.600]		AMP	4889.4 -88.61
516042 [DINAR_RES2 33.600]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	0.0 0.00
522721 [DINAR-OSB 154.00]		AMP	3743.1 -82.70
522721 [DINAR-OSB 154.00]	513021 [KECIBORLU 154.00] 1	OUT AMP	2602.4 -77.21
522721 [DINAR-OSB 154.00]	516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	3743.1 -82.70
522721 [DINAR-OSB 154.00]	521621 [BOZKURT 154.00] 1	OUT AMP	1203.3 -94.94
522721 [DINAR-OSB 154.00]	522741 [DINAR-OSB 31.500] 1	OUT AMP	3743.1 -82.70
522741 [DINAR-OSB 31.500]		AMP	5423.9 -88.00
522741 [DINAR-OSB 31.500]	522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	0.0 0.00

Şekil 10: Dinar RES servis harici durumda Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 faz kısa devre akımları sonuçları

Yapılan kısa devre analizlerde 154 kV merkezler olan Dinar RES ve Dinar OSB trafo merkezlerinin Dinar RES tam yükte ve servis harici olma durumunda 3 faz kısa devre akımları 154 kV ve 31,5 kV bara için elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarının TEİAŞ Elektrik Şebeke Yönetmeliği'ndeki sınırlar baz değerlerine uygun olduğu görülmektedir.

4. Bulguların Değerlendirmesi

Bu çalışmada, yük akış ve kısa devre akım analizleri yapılmıştır.

Elde edilen yük akış analizleri incelendiğinde rüzgar enerjisi santrallerinin diğer (hidrolik,termik vb.) santral tiplerine benzer şekilde çalıştığı gerek aktif gerekse reaktif güç akışından görülmektedir.

Dinar RES rüzgar 115 MW üretim yapıldığında, rüzgar parkı (Dinar RES OG, 516061) ile 154 kV şalt sahası (Dinar RES, 516021) arasındaki orta gerilim kablosundan çekilen kapasitif güç 3,5 MVar'dır (Şekil 7). Bu durumda güç faktörü ($\cos\phi$)=1 olmaktadır. Dinar RES rüzgar parkında 2,3 MW üretim yapıldığında, rüzgar ile 154 kV şalt sahası arasındaki orta gerilim kablosundan çekilen kapasitif güç 17,5' dir (Şekil 8). Bu durumda güç faktörü ($\cos\phi$) 0,18 (kapasitif) olmaktadır.

Rüzgar üretilen gücün düşük olduğu durumlarda rüzgar ile şalt sahası arasındaki O.G. kablolarının kapasitif etkisinin baskın duruma geldiği analiz sonuçlarında görülmüştür. Bu nedenle, güç faktörünü düzeltmek amacıyla öngörülecek kompanzasyon tesisinin rüzgar parkının içine değil sistem bağlantı noktasında (SBN) tesis edilmesi daha uygun olacaktır.

115 MW kurulu güçteki Dinar RES'in sisteme bağlanması bu güçteki bir termik veya hidrolik santralin bağlanması sırasında oluşan etkiyi yaratmıştır. Yük dağılımında görüldüğü gibi tam yükte çalışırken yükün önemli kısmı Dinar OSB TM üzerinden Keçiborlu TM'ye aktığı için , tek grup(2,3 MW) yükte iken yine tam yükteki gücünü % 80 oranında Dinar OSB üzerinden Keçiborlu TM'ye aktığı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi Dinar RES radyal bağlı olduğu Dinar OSB TM'nin yük akışını değiştirmekte diğer TM'lerin yük akışında büyük farklara sebep olmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan diğer bir analiz kısa devre analizidir. Dinar RES'in tam yükte (115 MW) ve servis harici (0 MW) olma durumunda Dinar RES TM ve Dinar OSB TM'nin TEİAŞ'ın belirlediği 154 kV ve 31,5 kV baralardaki kısa devre akım değerlerinin dışında olmadığı görülmektedir. Bu durumda böyle bir rüzgar enerjisi santrali enterkonnekte sisteme dahil olduğunda herhangi bir kısa devre arıza durumunda sorun çıkmadan arızanın sönmüşlebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1: Dinar RES tam yükte(115 MW) çalışırken Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 faz kısa devre akımları

Trafo Merkezi	Gerilim Seviyesi (kV)	Sistem Kısa Devre Sınır Akım Değeri (kA)	Hesaplanan Kısa Devre Değeri (kA)
Dinar RES	154	31,5	3,452
Dinar RES1_OG	33,6	25	6,311
Dinar RES2_OG	33,6	25	6,281
Dinar OSB	154	31,5	4,171
Dinar OSB_OG	31,5	16	5,634

Tablo 2: Dinar RES servis harici(0 MW) durumunda Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 faz kısa devre akımları

Trafo Merkezi	Gerilim Seviyesi (kV)	Sistem Kısa Devre Sınır Akım Değeri (kA)	Hesaplanan Kısa Devre Değeri (kA)
Dinar RES	154	31,5	3,007
Dinar RES1_OG	33,6	25	4,889
Dinar RES2_OG	33,6	25	4,889
Dinar OSB	154	31,5	3,743
Dinar OSB_OG	31,5	16	5,423

Tablo 1 ve Tablo 2’de değerler incelendiğinde Dinar RES aktif durumda iken her iki TM’nin 3 faz kısa devre değerleri servis harici olma durumuna göre daha yüksektir. olduğu bu değerler yönetmeliğin sınır değerleri olan 154 kV için 31,5 kA ve 31,5 kV için 16 kA olan sınır değerleridir. Dinar RES’in bağlı olduğu 33,6 kV bara sisteme bağlantı konusunda en önemli değeri teşkil etmekte bu değer 6,311 kA olup belirtilen sınır değerin çok altındadır.

5. Sonuçlar

Rüzgar, yenilebilir enerji kaynağı olması, genel olarak basit bir yapıda olması, elde edilen verimin yüksek olması, diğer santrallere göre çok kısa sürede kurulabilmesi gibi nedenlerle elektrik enerjisi üretimindeki payı sürekli artmaktadır. Ancak, rüzgar santrallerinin diğer konvansiyonel santrallerden farklı yapıda olması nedeniyle buldukları bölgelerde elektrik şebekesine bağlantıları sırasında güç kalitesi yönünden bazı sorunlar meydana gelmektedir. Bu sorunları giderebilmek amacıyla yapılan çalışmalar göstermektedir ki; doğruluk oranı yüksek rüzgar tahminlerinin yapılması, uygun ve teknik kapasitesi yüksek generator seçimi, gerilim dalgalanmalarının

en aza indirilmesi, harmonik ve flikerin belirlenen sınır değerler içinde tutulması, rüzgar türbininin arıza ve arıza sonrası tepkilerinin ilgili kriterlere uyması, aktif ve reaktif gücün kontrolünün yapılması güç kalitesini artıran en önemli faktörlerdir.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin enerji sistemi içinde yük olarak değil enerji santralleri olarak kabul edilerek dinamik tepkilerin incelenmesi yeni şebeke bağlantı koşullarının temelini oluşturmakta ve modellemenin bu yaklaşımla oluşturulmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle ele alınan örnek rüzgar santrali Dinar RES PSS/E programında modellenmiş yük akış analizleri ve kısa devre analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde sistem davranışları önceden kestirilebildiği ve buna göre planlama yapılabileceği görülmüştür.

Dinar RES’ in 115 MW anma gücünde ve 2,3MW gibi oldukça düşük güçte üretim yaptığı durumlara ilişkin yük akışı analizlerinden sisteme verilen aktif ve reaktif güç değerleri bulunmuştur. Buna göre;

- 115 MW üretim yapıldığında rüzgar ile 154 kV şalt sahası arasındaki O.G. kablosundan çekilen kapasitif güç 3,5 Mvar, güç faktörü ise yaklaşık 1 olmaktadır.
- 2,3 MW üretim yapılması durumunda ise çekilen güç 17,5 Mvar, güç faktörü 0,18 kapasitif olmuştur. Yani üretim çok düşük olduğunda, kablonun kapasitif etkisi baskın olmaktadır.
- 115 MW güçteki Dinar RES’in sisteme bağlanması bu güçteki bir termik veya hidrolik santralin bağlanması sırasında oluşan yük akışı aynı olmuştur.
- PSS/E ile modellenen sistemde 154 kV Dinar RES ve Dinar OSB baraları ile 34,5 kV Dinar RES ve Dinar OSB OG baralarında yapılan kısa devre analizlerinde bulunan kısa devre akım değerlerinin, sistem sınır değerlerinin altında olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada, Türkiye elektrik iletim sistemine entegre olmuş büyük güçteki bir rüzgar santralinin PSS/E ile modellenmesi ile yük akışı ve kısa devre simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar örnek uygulamanın uygun bir modelleme olduğu ve gelecekte sisteme entegre edilecek rüzgar enerjisi santralleri için örnek bir çalışma olarak kullanılabilen sonuçuna ulaşılmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Ackermann, T., Söder, L., “Wind Energy Technology and Surrent Status: a Review” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 4, pp. 315-374, 2000.
- [2] Ackerman, T., and Söder, L., An overview of wind energy status 2002, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 6, pp 67-128, Pergamon Press, 2002.
- [3] Heier, S., translated Waddington, R., Grid integration of wind energy conversion systems, John Wiley&Sons, ABD, 1998
- [4] Kocaman, M. 2010.Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Türkiye Elektrik Sistemine Olan Etkilerinin Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [5] World Wind Energy Report 2015 , www.wwindea.org (World Wind EnergyAssociation)

- [6] Dunder,P. “Daha İyi Rüzgar Türbinleri”, Tübitak Bilim ve Teknoloji Haberleri, www.biltek.tubitak.gov.tr
- [7] Özaktürk, M., “Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi”, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2007
- [8] Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu Temmuz 2014 www.tureb.com.tr s. 7
- [9] Güç Kalitesi Milli Projesi, www.guckalitesi.gen.tr
- [10] Akdeniz E., “Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi ve kararlılığı üzerine etkilerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006
- [11] Rajveer Mittal, “Low Voltage Ride-Through (LVRT) of Grid Interfaced Wind Driven PMSG” ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 4, No. 5, p.73-83, July 2009
- [12] Arsan, F., 2001.Şebeke Bağlantı Yöntemleri,Rüzgar Enerjisi Sempozyumu 2001 s. 143-147.
- [13] w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx
- [14] Saner, Y., Güç Dağıtım Kısa Devre Hesapları,4(1), 41-48, 2000.
- [15] Hewitson L.G., Brown M., Balakrishnan R., Simple calculation of short-circuit currents, Practical Power System Protection, 4, 11-25, 2005.
- [16] Kaşıkçı, İ., Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesapları ve Uygulamaları IEC 60909, 27-39, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [17] <http://www3.epdk.org.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=1533/07.05.2015>, Syf 173-175