REZERVUAR SİSTEMİNİN
OLASILIKLI AKIM TAHMİNLERİ İLE
GERÇEK ZAMANLI OPTİMAL KONTROLÜ

Doktora Tezi

Gökçen UYSAL

Eskişehir 2017

REZERVUAR SİSTEMİNİN OLASILIKLI AKIM TAHMİNLERİ İLE GERÇEK ZAMANLI OPTİMAL KONTROLÜ

Gökçen UYSAL

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabili Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Aralık 2017

Bu tez çalışması TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ve BAP Komisyonunca kabul edilen 1506F502 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gökçen UYSAL'ın "Rezervuar Sisteminin Olasılıklı Akım Tahminleri ile Gerçek Zamanlı Optimal Kontrolü" başlıklı tezi 04/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN	.....
Üye	: Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ	.....
Üye	: Prof. Dr. Elçin KENTEL ERDOĞAN	.....
Üye	: Prof. Dr. Ali Ünal ŞORMAN	.....
Üye	: Prof. Dr. Erdem Ahmet ALBEK	.....

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

REZERVUAR SİSTEMİNİN OLASILIKLI AKIM TAHMİNLERİ İLE GERÇEK ZAMANLI OPTİMAL KONTROLÜ

Gökçen UYSAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık 2017

Danışman: Doç. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN

Artan su ve enerji ihtiyaçları, değişen hidro-iklimsel koşullar, kompleks sistem yapısı ve sistemdeki belirsizliklerden ötürü rezervuarların gerçek zamanlı optimal kontrolü zor bir problemdir. Bu çalışmada, problem farklı aşamalarda çözülmüştür. İlk olarak, geri beslemeli ve önsezili kontrol kullanılarak birleşik bir işletme tekniği önerilmiştir. Bu amaçla, Kapalı Stokastik Optimizasyon (KSO) ile geçmiş yıllar verisi kullanılarak karakteristik bir Rehber Eğri (RE) çıkarılmıştır. Sonrasında, bu RE kuraklık ve taşkın senaryoları ile test edilerek iyileştirilmiştir. Kısa dönem taşkın kontrolü ise Model Önsezili Kontrol (MÖK) ile sağlanarak model performansları geçmiş dönem tahminlemede (hindcast) mükemmel ve pertürbe edilmiş tahminlerle test edilmiştir. Bu durum, gerçek zamanlı bir işletmede tutarsız tahmin verileri kullanımının, kontrol güvenilirliğini etkilediğini göstermiştir. İkinci aşamada, tahmin belirsizliği dikkate alınarak yeni bir sentetik yöntemle Olasılıklı Akım Tahminleri (OAT) üretilmiş ve optimizasyonda kullanılmıştır. Kullanılan güncel teknik, Ağaç Tabanlı MÖK (AT-MÖK) olarak anılan senaryo ağaçlarını kullanan çok aşamalı stokastik MÖK'dür. Yöntem, kısıtlı mansap kanalı kapasitesinden dolayı zorlayıcı dolusavak işletmesi gerektiren bir test örneğinde uygulanmıştır. Sonuç olarak, AT-MÖK, maksimum pik debisi ve taşkın hacim göstergelerine göre su temini ve enerji üretiminden ödün vermeksizin mansap bölgesindeki taşkın riskini en aza indirgeyerek deterministik eş değeri MÖK'den daha iyi performans göstermiştir. Çalışma, olasılık tahminleri ve en yeni optimal kontrol yöntemleri ile bir rezervuar sisteminin işletimsel olarak iyileştirilmesini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Gerçek zamanlı rezervuar işletme, Model önsezili kontrol, Taşkın, Su temini, Hidrogüç

ABSTRACT

REAL TIME OPTIMAL CONTROL OF A RESERVOIR SYSTEM WITH PROBABILISTIC STREAMFLOW FORECASTS

Gökçen UYSAL

Department of Civil Engineering
Anadolu Univeristy, Graduate School of Sciences, December 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN

Real time optimal control of reservoirs is a challenging task due to increasing water and energy demands, changing hydroclimatic conditions, complex system structure and uncertainties in the system. In this study, the problem is solved in several stages. In the first one, an operating technique is proposed by a joint approach using feedback and predictive controls. To that end, Implicit Stochastic Optimization is employed to derive a characteristic Guide Curve (GC) using historical data. Later, GC is tested and improved according to drought and flood inflow scenarios. Short term flood control is accomplished by Model Predictive Control (MPC) and the model performances are tested using perfect and perturbed forecasts via hindcast experiments. This part shows us, the control robustness can be affected by inconsistent forecasts during a real-time operation. At this point, second stage is intended for consideration of forecast uncertainty; thus Probabilistic Streamflow Forecasts (PSF) are generated by a new synthetic method and utilized in the optimization. An up-to-date technique is multi-stage stochastic MPC using scenario trees, referred to as Tree-Based MPC (TB-MPC). The methodology is applied to a test case which requires a challenging spillway operation due to the restricted downstream channel capacity. As a result, TB-MPC outperforms deterministic counterpart MPC in terms of minimizing downstream flooding risk according to maximum peak flow and flood volume indicators without compromising the water supply and energy generation. Finally, the study shows operational improvement of a reservoir system by probabilistic forecasts and latest optimal control methods.

Keywords: Real time reservoir operation, Model predictive control, Flood, Water supply, Hydropower

SEVGİLİ EŞİM SİNEM'E

VE BİRİCİK OĞLUM TOPRAK'A...

ÖNSÖZ

İnsanlar asırladır birçok medeniyeti su kaynaklarına yakın yerlerde kurmuş ve su kaynaklarını ellerinde bulundurmak için birbirleri ile sürekli mücadele etmişlerdir. Göçebe yaşamdan suya dayalı tarımsal hayata geçiş, büyük nüfusların beslenebilmesi ve medeniyetin ortaya çıkışı Mısır'da Nil Nehri civarında, Çin'de Sarı Nehir (Huang Ho) çevresinde, Güney Asya'da İndus Nehri vadisinde, (Sümer, Akad, Babil, Asur ve Elam medeniyetleri ile) Mezopotamya'da ise Dicle ve Fırat Nehirleri arasında görülmüştür. Bu medeniyetler arasında, bilinen ilk kanunlardan olan ve MÖ 1792 – 1750 yıllarında hüküm süren Babil kralı Hammurabi tarafından konan kanunlardan 53.sü'nde; "Bir kimse tembellik yapıp da sahibi olduğu barajın (su bendinin) bakımını yapmayarak yıkılmasına neden olup diğer kişilerin tarlasında su basmasına sebep olur ve ürünlerine zarar verirse; o kişinin malları satılarak, bu yeterli olmazsa kendisi köle olarak satılarak zarara neden olduğu mısırın karşılığı tazmin edilir" denilmektedir (King, 2014). Bu belge bize geçmiş çağlarda insanlığı ilgilendiren ilk konulardan birinin su ve su kaynağının kontrolü olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma da, binlerce yıldır devam eden suyu kontrol etme ihtiyacı ve arzumuzun bir devamıdır. Okumakta olduğunuz doktora tez çalışması en genel hali ile şu sorulara yanıt aramaktadır:

1. Su kaynaklarının gerçek zamanlı işletilmesinde neredeyiz?
2. Her biri önemli ancak birbiriyle çelişen hedefler (taşkın kontrolü, su temini ve enerji üretimi) altında gerçek zamanlı optimum bir işletme mümkün müdür?
3. Güncel teknoloji ürünü olasılıklı akım tahminlerini otomatik karar mekanizmasında nasıl kullanabiliriz?

Bu konuları bir parça da olsa aydınlatılattığını düşündüğüm araştırma ve uygulama çalışmasına giriş yapmadan önce, çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçenlere teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Öncelikle, lisans eğitiminden doktoraya kadar devam eden uzun soluklu yetişme sürecimde her türlü zorluğu birlikte aştığım, yaptığım işi bana sevdiren, her soruna akılcı ve çözülebilir şekilde yaklaşan, çalışma disiplinini ve mücadele ruhunu örnek aldığım çok değerli ve saygıdeğer hocalarımdan başta danışmanım Doç. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN olmak üzere Yard. Doç. Dr. Ali Arda ŞORMAN'a saygı, sevgi ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma sizlerin tükenmez desteğiyle ortaya çıkmıştır.

Bilim aşkını ve çalışma disiplinini örnek aldığımız, bizlere ilham olan, tez çalışmasının değerlendirilmesinde değerli katkıları olan saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Ali Ünal ŞORMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının gelişmesi sürecini başından beri takip eden ve katkılarını sunan değerli tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ ve Prof. Dr. Elçin KENTEL ERDOĞAN'a ve tezin değerlendirilmesi aşamasında katkılarından dolayı Prof. Dr. Erdem Ahmet ALBEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bilimsel çalışma azmini ve hayata karşı bakışını örnek aldığım, lisansüstü eğitimimde çok değerli katkıları olan Doç. Dr. Emine Eftade GAGA'ya hayatıma kattığı güzellikler için teşekkür ederim.

Duisburg-Essen Üniversitesi, Hidrolik Mühendisliği ve Su Kaynakları Yönetimi Enstitüsü Başkanı Prof. Dr.-Ing. André NIEMANN başta olmak üzere doktora sırası araştırma süresinde Almanya'da danışmanlığımı yapan Dr.-Ing. Dirk SCHWANENBERG'e, tüm bölüm öğretim elemanlarına ve ayrıca araştırma süresince yardımlarını esirgemeyen Rodolfo ALVARADO-MONTERO'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Almanya'da bulunduğum sürede her anımda bana yardımcı olan çok sevgili dostlarım Susanne MÜNCH ve Şafak TARTANOĞLU BENNETT'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Doktora süresince birlikte çalıştığım, tartıştığım, çeşitli toplantı ve bilimsel etkinliklerde birlikte katıldığım çalışma arkadaşlarım Bulut AKKOL, Cansaran ERTAŞ ve Cihan ÇOŞKUN'a, ayrıca bölüm arkadaşım Derya ÖVER KAMAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Lise yıllarından beri birlikte olmaktan keyif aldığım değerli arkadaşlarım Hüseyin BUDAK, Ahmet ÖZHAN, Ömürcan TOPAL, Mete BALCI, Erdem TÜRKUÇAR, Koray SAĞLAM ve Cengizhan CENGİZ'e de her zaman yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan, dürüstlüğü, yardımseverliği ve paylaşmayı kendisinden öğrendiğim doktora çalışmalarım sırasında aramızdan ayrılan ve derin özlem duyduğum canım babam İsmail UYSAL'a; her zaman ve her koşulda yanımda olduğunu bildiğim, üzerimde büyük emeği olan, gücünü, sabrını, azmini ve çalışkanlığını örnek aldığım canım annem Firdevs UYSAL'a ve beraber büyüdüğüm, her zaman yanımda olan ve olacağını bildiğim biricik kardeşim Tuğçe UYSAL'a da destekleri ve sabırları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda ve destek olan sevgili dayım Halil AVGAN ile çok sevgili teyzelerim Neslihan GÜNDOĞAR ve Ayşe AYHAN'a da bu süreçteki katkıları için ayrıca teşekkür ederim.

Yakın zamanda ailemden bir parça olan Salih BALCI, Beyhan BALCI, Didem BALCI GÜVENER, Volkan GÜVENER, Ecem BALCI ile Necdet ELGÖRMÜŞ'e de yanımda oldukları ve hayatın yükünü bir nebze de olsun hafiflettikleri için ayrı ayrı teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak; bu zorlu yolda her zaman yanımda olan; her koşulda bana uyum sağlayan; sabırla, sakinlikle, inançla ve sevgiyle beni destekleyen ve doktora sürecimin sonlarında bana güzeller güzeli bir evlat veren değerli eşim Sinem BALCI UYSAL'a ve ailemizin yeni üyesi biricik oğlum Toprak'a hayatımda oldukları için minnettar olduğumu belirtmek isterim.

04/12/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı"yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Gökçen UYSAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii
ÖZET iii
ABSTRACT iv
ÖNSÖZ vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ ix
İÇİNDEKİLER x
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvi

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Önemi 1
1.2. Çalışmanın Amacı 3
1.3. Çalışmanın İçeriği 4

İKİNCİ BÖLÜM

2. LİTERATÜR 6
2.1. Uzun Dönem Planlama ve Kısa Dönem Optimum İşletme 7
2.2. Su Kaynakları Yönetiminde Kontrol Problemi 12
2.2.1. Dinamik sistem ve dinamik programlama (DP) 12
2.2.2. Model önsezili kontrol (MÖK) 13
2.2.3. Su kaynakları kontrolünde MÖK uygulamaları 15
2.3. Tahmin Belirsizliği ve Çoklu Akım Tahminleri 16
2.4. Olasılık Tahminlerin Kontrolde Kullanımı 17
2.5. Uygulama Alanına ait Çalışmalar ve Tezin Literatürdeki Yeri 21

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. OPTİMUM İŞLETME VE BELİRSİZLİK 23
3.1. Gerçek Zamanlı Su Kaynakları Kontrol Yöntemleri 26
3.1.1. Geri beslemeli kontrol (GBK) 28
3.1.2. Model önsezili kontrol (MÖK) 29
3.2. Deterministik Model Önsezili Kontrolü 32
3.2.1. Deterministik akım tahminlerinin (DAT) üretilmesi 33

Sayfa

3.3. Tahmin Belirsizliğinin Gözetilerek Stokastik Model Önsezili Kontrolü 35
3.3.1. Olasılıklı akım tahmin (OAT) üretilmesi 36
3.3.2. Çoklu-aşama stokastik model önsezili kontrolü 39
3.3.3. Çoklu-olasılıklı girdilerin azaltma yöntemleri 41
3.4. Gerçek Zamanlı Kontrol Uygulama Yöntemi 43
3.4.1. Flood Early Warning System (FEWS) 43
3.4.2. Real-Time Control (RTC) tools 46
3.4.3. IPOPT ile matematiksel optimizasyon 47
3.4.4. Adjoint modelleme 49

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SU TEMİNİ VE TAŞKIN KORUMA KONTROL UYGULAMASI (UYG-A) 51
4.1. Çoklu Amaca Hizmet Eden Rezervuar Örneği 51
4.2. Model Kurulumu 55
4.3. Testler ve Sonuçları 58
4.3.1. Günlük işletme modeli kurulumu 58
4.3.1.1. Su temini tabanlı GBK testleri (Test-I & Test-II) 61
4.3.1.2. Uzun dönem kapalı stokastik optimizasyon ile rehber eğrinin oluşturulması, (Test-III) 66
4.3.1.3. Rehber eğrinin GBK'de test edilmesi (Test-IV ve V) 72
4.3.1.4. Kapalı döngü model kurulumu (gerçek zamanlı uygulama, Test-VI) 75
4.3.1.5. Kapalı döngü model tahmin değeri testi (Test-VI) 79
4.3.2. Saatlik işletme model kurulumu 81
4.3.2.1. Mükemmel tahmin hindcast (MTH) testleri 86
4.3.2.2. Deterministik tahmin hindcast (DTH) testleri 88
4.3.2.3. Olasılıklı tahmin hindcast (OTH) testleri 90
4.3.3.4. Saatlik hindcast sonuçlarının karşılaştırılması 96

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİ VE TAŞKIN KORUMA KONTROL UYGULAMASI (UYG-B) 103
5.1. Hidroelektrik Santral Örneği 103
5.2. Testler ve Sonuçları 104

Sayfa

5.2.1. Mükemmel tahmin hindcast (MTH) testi 104
5.2.2. Deterministik ve olasılıklı tahmin hindcast (DTH ve OTH) testi .. 106
5.2.3. Sonuçların karşılaştırılması 109

ALTINCI BÖLÜM

6. SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER 112
6.1. Stokastik Doğada Karar Verme 112
6.2. Sonuçların Değerlendirilmesi 113
6.3. Gelecek Çalışmalar için Öneriler 116
KAYNAKÇA 118
ÖZGEÇMİŞ 129

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. *Rezervuar sistemi gösterimi* 24
Şekil 3.2. *Bir GBK işletim örneği* 27
Şekil 3.3. *MÖK'ün temsili bir anlatımı* 30
Şekil 3.4 *MÖK'nin dinamik çalışma prensibi* 31
(u_k:k anındaki optimal kontrol yörüngesi, u_{k+1}: k+1 anındaki yeni-optimal kontrol yörüngesi) 31
Şekil 3.5 *Tek zaman aralığında DAT üretiminin gösterimi (k anında;* qk: gözlem, qk : tahmin, εk: hata) 34
Şekil 3.6. *Olasılıklı tahminlerin tahmin ufkunda davranışı* 36
Şekil 3.7 *Tek zaman aralığında tahmin belirsizliğinin OAT ile şematize edilmesi* 37
Şekil 3.8 *Ağaç tabanlı azaltım örneği* 42
Şekil 3.9 *FEWS database tabanı ve modellerle ilişkisi* 45
Şekil 3.10 *Uygulama alanından girdi gösterimi: (a) Toplam baraj giriş akımları (QIN) ve içme & kullanma suyu akım grafikleri (QWS.OP); (b) Baraj seviye değişimi (H.OP); (c) Buharlaşma verisi (E)* 45
Şekil 3.11 *RTC-Tools çalışma hiyerarşi şeması* 46
Şekil 3.12 *İterasyon adımları karşılığında (a) amaç fonksiyonu, (b) primal infizibilite, (c) dual infizibilite* 49
Şekil 4.1. *Yuvacık Baraj havzası, nehir ağı, ölçüm istasyonları ve baraj gölü* 51
Şekil 4.2 *Rezervuar hacim-seviye eğrisi ve dolusavak deşarj eğirisi* 54
Şekil 4.3 *Günlük işletme kontrol modelleri hiyerarşisi ve test numaraları* 60
Şekil 4.4 *Normal durum ve kuraklık durumları için MakSev-GBK sonuçları (Test-I) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]* 62
Şekil 4.5 *Günlük testler için oluşturulan taşkın senayosu ve pertürbe edilmiş taşkın senaryosu* 64
Şekil 4.6 *Taşkın durumu için MakSev-GBK sonuçları (Test-II) (Dolusavak deşarjı [m^3/s], Rezervuar seviyesi [m], Giriş akımları [m^3/s])* 65
Şekil 4.7 *2010 yılı deşaj olmayan dönem optimizasyon (RTC) ve gözlem seviye sonuçları karşılaştırması (model doğrulaması)* 67
Şekil 4.8 *M1 modeli uzun dönem KSO sonuçları (Test-III) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]* 68

Sayfa

Şekil 4.9 *Dolusavak kret kotu ve maksimum seviye arasındaki M1 modeli sonuçları analizi ve planlanan Rehber Eğri (RE)* 70
Şekil 4.10 *M1 ve M2 modellerinin karşılaştırması (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]* 71
Şekil 4.11 *Normal ve kuraklık durumları için ORE-GBK işletme sonuçları (Test-IV) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]* 73
Şekil 4.12 *MaxLev-GBK sonuçları ile karşılaştırmalı olarak taşkın koşullarında ORE-GBK işletme sonuçları (Test-V)* 74
Şekil 4.13 *Hindcast_01 testi açık ve hindcast performası karşılaştırması* 78
Şekil 4.14 *Hindcast_02 için MÖK sonuçları (pertürbe edilmiş taşkın akımları ile)* 80
Şekil 4.15 *Saatlik model hiyerarşisi* 82
Şekil 4.16 *Kontrol modeli girdisi (Senaryo-01) saatlik akım tahminleri (MAT: siyah düz çizgi, DAT:kırmızı kesikli çizgi, OAT:gri düz çizgiler)* 84
Şekil 4.17 *Kontrol modeli girdisi (Senaryo-01) saatlik akım tahminleri (MAT: siyah çizgi, OAT:gri çizgiler, ağaç tabanlı azaltılmış OAT: kırmızı çizgiler)* 85
Şekil 4.18 *MT ile hindcast testleri (MTH) tahmin ufku performanslarının karşılaştırılması a) Dolusavak deşarjı [m^3/s] b) Rezervuar seviyesi [m]* ... 87
Şekil 4.19 *DAT ile hindcast denemeleri tahmin ufku performansının karşılaştırılması (Senaryo-01) (a) Dolusavak deşarjı [m^3/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]* 89
Şekil 4.20 *Stokastik optimizasyonda rassal bir tahmin anında ağaç tabanlı rezervuar seviyesi ve dolusavak deşarjları örneğ* 91
Şekil 4.21 *OTH ağaç dalı seçimi için DTH ve çeşitli farklı ağaç dalı sayısına sahip OTH'nin karşılaştırmalı gösterimi (a) Dolusavak deşarjı [m^3/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]* 93
Şekil 4.22 *Belirsizlik seviyesi performans karşılaştırılması* 94
Şekil 4.23 *Olasılıklı tahminler ile hindcast denemeleri tahmin ufku performansının karşılaştırılması (Senaryo-01) (a) Dolusavak deşarjları [m^3/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]* 95
Şekil 4.24 *Üç farklı kurulumda (MTH, DTH, OTH) ve farklı tahmin ufkuna göre rezervuar seviyesi [m] ve dolusavak deşarjlarının [m^3/s] karşılaştırılması (Senaryo 01) (a) 24 saat, (b) 36 saat, (c) 48 saat* 97

Sayfa

Şekil 4.25 *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait pik dolusavak deşarj [m^3/s] performans değerlendirme sonuçları* 99

Şekil 4.26 *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait "mansap kanalından taşan hacim [1000 m^3]" performans değerlendirme sonuçları* 101

Şekil 5.1 *Hidroelektrik santral içeren örneğin karşılaştırmalı MTH sonuçları (a) Rezervuar seviye değişimi [m] (b) Kontrollü (dolusavak ve türbin) deşarjları [m^3/s]* 106

Şekil 5.2 *UYG-A ve UYG-B karşılaştırmalı DTH ve OTH sonuçları (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s) (c) Türbinden bırakılan akım (m^3/s)* 108

Şekil 5.3 *DTH kapalı-döngü işletme sonuçlarının türbinsiz sistemle karşılaştırılması (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s)*..... 109

Şekil 5.4 *OTH kapalı-döngü işletme sonuçlarının türbinsiz sistemle karşılaştırılması (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s)*..... 110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AD	: Automatic Differentiation
ASO	: Açık Sokastik Optimizasyon
AT-MÖK	: Ağaç Tabanlı Model Önsezili Kontrol
DAT	: Deterministik Akım Tahmini
DP	: Dinamik Programlama
DTH	: Deterministik Tahmin Hindcast
FEWS	: Flood Early Warning System
GBK	: Geri Beslemeli Kontrol
IPOPT	: Interior Point OPTimizer
KSO	: Kapalı Stokastik Optimizasyon
MMPC	: Multiple Model Predictive Control
MÖK	: Model Önsezili Kontrol
MPC	: Model Predictive Control
MTH	: Mükemmel Tahmin Hindcast
OAT	: Olasılklı Akım Tahmini
OTH	: Olasılıklı Tahmin Hindcast
PID	: Proportional-Integral-Derivative
RE	: Rehber Eğri
RTC-Tools	: Real Time Control-Tools
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SSDP	: Sampling Stokastik Dinamik Programlama
XML	: eXtensible Markup Language

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Önemi

Su, var olan hayatın temeli ve doğal yaşamın devam etmesi için yeri doldurulamaz bir kaynaktır. İnsan vücudununun % 70'i, damarlardaki kanın ise % 83'ü sudan oluşmaktadır. İnsanoğlunun biyolojik ihtiyaç dışında; temizlik ve gündelik işler gibi sebeplerle günlük en az 15 litre, bütün ihtiyaçlarını giderecek ve tüm hijyen koşullarını sağlayabileceği günde yaklaşık 100 – 500 litre arasında su miktarına ihtiyacı vardır. Bunun yanısıra günlük olarak üretilen ve tüketilen birçok ürün için de su kullanılmaktadır. Örneğin; üretilen 1 kg et için 15000–70000 kg; yetiştirilen 1 kg patates için ise 500–1500 kg su gerekmektedir (Gleick, 2000). Bu açıdan, mevcut tatlı su kaynakları olan nehirler, göller, insan yapımı baraj rezervuarları hayatımızın sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Yüzey sularını ve dolayısıyla akış halinde olan nehirleri düzenlemek ve kontrol etmek için dünya çapında binlerce su yapısı inşaa edilmiş ve halen inşa edilmektedir. Yine de bir milyar insanın henüz güvenli içme suyuna erişimi yoktur (Rani ve Moreira, 2010). Dünya Barajlar Komisyonu'na göre yıllık çekilen su miktarı tahmini olarak 3800 km^3 ile 50 yıl öncekinin iki katı kadardır (WCD, 2000). Artan nüfus ve azalan kaynaklar ise içme, kullanma ve enerji ihtiyaçları sebebiyle su kaynakları işletmesi üzerindeki baskıyı gün geçtikçe arttırmaktadır.

Su ve enerji ihtiyacındaki artan küresel talebi karşılamak aşılması gereken en önemli zorluklardan birisidir. İnsanlık, son yıllarda enerjiye daha önce hiç olmadığından daha çok ihtiyaç duymaktadır. Dünyanın bir tarafında, gelişmiş bilgisayar ve akıllı telefon teknolojisi olmadan hayatlarına devam edemeyen insan grupları varken, öte yanında hala 2 milyar insan elektrik olmadan yaşamaktadır. Bu noktada, sudan elde edilecek enerji ise temiz, ham maddeye ihtiyaç duymayan ve yenilebilir bir enerjidir. Hidroelektrik üretimi depolamalı, nehir tipi ve pompajlı santrallerden elde edilebilir. Nehir tipi kısıtlı depolama hacmine sahip HES'lere nazaran depolamalı HES'ler işletimsel esneklik sağlar. Bu yapılar aslında bir nevi üretebildiğimiz en büyük bataryalardır ve hala enerji depolama için bildiğimiz en iyi yöntemlerden biridir. Eğer iyi bir işletme stratejisi geliştirebilirse, meteorolojik ve mevsimsel değişkenlikleri de kontrol edilebilir. Bu ise mevcut kaynak

potansiyelinden ziyade, veriler ve gelişmiş kontrol araçları ile doğru politikaların uygulanarak ileriye rasyonel bir bakış açısının önemini vurgulamaktadır.

Sürekli hareket halinde olan suyun, bir durumdan diğer duruma, bir konumdan diğer konuma olan yolculuğunun planlanması ve yönetilmesi oldukça karmaşık ve zordur (Biswas, 2004). Johann Wolfgang von Goethe'nin de dediği gibi "*Das Wasser ist ein freundliches Element für den, der damit bekannt ist und es zu behandeln weiß*" yani "Su, onu tanıyan ve nasıl başa çıkacağını bilen için dost bir unsurdur". Optimum bir işletme kontrolü sağlandığında; hem su ihtiyacı hem de enerji ihtiyacı en iyi şekilde sağlanabilir. Öte yandan, geçmişten günümüze devam eden taşkın ve kuraklık durumlarına da hazırlıklı olmak gerekmektedir. Artan karbon emisyonu ve dolayısı ile gerçekleşen küresel ısınma kuraklığa sebep olurken diğer bir yandan da atmosferde su buharı oranındaki artış hem sıcaklık artışına katkı sağlamakta hem de anlık ve kolayca öngörülemeyen ani yağışlara ve dolayısıyla taşkınlara, maddi hasarlara ve can kayıplarına yol açmaktadır. Bu açılardan su en acil ele alınması gereken öncelikli bir alan olmaktadır.

Nature Dergisi'nin 4 Kasım 1869 ilk sayısında çıkan makalelerden bir tanesi büyük sulama projesi olan Hindistan Ganj Kanalı'nda görev alan inşaat mühendisi T. Login'in, dönemin ilgi çeken ve 17 Kasım 1869'da trafiğe açılan Süveyş Kanalı projesi üzerine sorduğu sorulardır. Login, editöre yolladığı mektubunda Nil Nehri tahribatı ile projenin başarısızlığa uğrayacağı endişelerini ve iyileştirmek için çözüm önerilerini sıralamıştır. Üzerinden geçen neredeyse 150 yıla rağmen, çalışmanın literatür bölümünde de detaylı bir şekilde görüleceği gibi su sistemlerinin kontrolü ve en faydalı kullanımı için yapılan iyileştirme arzusu çok daha detaylanmış bir şekilde hala devam etmektedir. Bu nedenle; entegre su kaynakları yönetimi varış yeri olmayan bir yolculuğa da benzetilmektedir (Biswas, 2004).

Gün geçtikçe artan çok sayıda veri, entegre modeller, kısıtlar gibi sebeplerle su kaynakları işletmesinde kontrol yöntemleri uygulamaları önem kazanmaktadır. Ancak su kaynakları yönetimindeki başarı tek başına kontrol sistemleri modellerindeki gelişmeler ile yeterli olmamaktadır. Bunun için özellikle hidrolojik süreçlerin anlaşılması ve bunların karar destek sistemlerinde doğru şekilde kullanılmaları oldukça önemlidir. Bu araştırma çalışmasında da; hidroloji, optimizasyon ve bilgisayar modelleme araçları birlikte kullanılarak etkili bir optimal kontrol arayışına girişilmiştir.

Son olarak, günümüzde su kaynakları sistemlerinin kontrolleri hidroinformatik adı verilen oldukça güncel bir bilim kolu altında gelişmektedir. Bu dal; nümerik modellerden,

yeni sensörlere ve araçlara, veri analizlerinden, karmaşık sistemlerin analizlerine ve model ile veri kontrol sistemlerin entegrasyonuna kadar birçok teorik bilgiyi ve pratik uygulamayı kapsamaktır. Hidroinformatik teknolojileri su bilimi, kontrol teknolojileri ve bilgi teknolojileri disiplinlerini bir şekilde ve bütünleşik ortak çalışmalar yapmaya itmektedir. Değişen ihtiyaçlar ve çevresel faktörler altında; su kaynaklarının verimli işletilmelerinde rol alacak uzmanların da gün geçtikçe gelişen bu alana katkı yapmak için farklı dallarda bilgi sahibi olması ve özellikle uygulama yapmaları oldukça önemlidir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın en genel amacı; sürekli veri akışı sağlanan ve gerçek zamanlı şekilde kontrol edilebilen su kaynaklarının karar sürecinde nehir akım tahminlerindeki belirsizlikleri faydalanalabilir hale getirmektir. Tam olarak anlaşılmayan ve sonuçları tam olarak tahmin edilemeyen süreçlere sıklıkla belirsiz denir. Tahmin belirsizliği ise ileride gerçekleşmesi beklenen ve hesaplanan su miktarındaki değişim aralığını kapsar. Bu araştırma çalışmasında belirsizlik değerlendirmesi, çoklu üyeye sahip olasılıklı akım tahminleri saçılımında üyeler arasındaki farkları ifade etmektedir. Günümüzde, su kaynaklarının yönetimlerinde nehir akımlarının gerçek zamanlı bir şekilde tahmin edilmeleri yeni gelişmekte ve uygulanmaktadır. Bunun yanısıra tahmin belirsizlikleri gözetecek işletme modelleri ise yetersiz kalmakta ve oldukça yeni olan bu konunun ele alınması gerekmektedir. Daha ekonomik bir stratejik yönetim hedefleyerek stokastik bir kontrol modeli geliştirme amacı bu çalışmanın başlatılmasında önemli bir etken olmuştur.

Ülkemizde su kaynakları işletmeleri genellikle geçmiş yıllar verileri ve ihtiyaç projeksiyonları ile tasarım boyutunda ele alınmaktadır. Öte yandan ise, geleneksel yöntemlerde optimizasyon çalışmaları ile aylık rehber eğrileri oluşturulabilmektedir. Bunun dışında, gerçek zamanlı günlük ve saatlik işletme çalışmaları için gerek kamu kurumlarında, gerekse de özel sektörde büyük bir eksiklik bulunmaktadır.

Barajların optimizasyon çalışmalarında sıklıkla kullanılan dinamik programlar, çoklu girdi rezervuar sistemlerinde boyut probleminden ötürü içinden çıkılamayacak hesap basamaklarını ve yoğun ilişkilerden ötürü modelleme sorunlarını beraberinde getirmektedir (Labadie, 2004). Her ne kadar bu sorunların üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler geliştirilse de (Sampling Stokastik Dinamik Programlama, Çoklu Aşamalı Stokastik Programlama vb.) yaklaşımlar her sistemde istenilen derecede kullanılabilir esnekliğe sahip değildir (Galelli vd., 2012). Üstelik olasılıklı (ensemble) tahminler çoklu

girdi oluşturduğundan bunların karar verme yöntemlerinde nasıl kullanılacağı sorunu da oldukça günceldir. Bu çalışmada; kısıtlı depolama kapasitesine sahip ve çoklu amaca yönelik işletilen rezervuarların kısa dönemli deşarj kararlarında tahmin belirsizliğini gözetecek gerçek zamanlı işletme amaçlanmaktadır. Birçok sistem, normal koşullar ve ortalama akımlar altında daha kolay yönetilebilir ve görece az hatalı işletme stratejileri uygulanabilir. Sistemini yönetecek stratejilerin, değişken çevre ve iklim koşullarını da dikkate alması ise farklı koşullara karşı dayanıklılığını ve güvenilirliğini (*robust*) arttıracaktır. Bu amaçlarla, özellikle taşkın ve kuraklık durumlarını da hesaba katarak ekstrem koşullar altında işletmeye yanıt verebilecek bir yöntem hedeflenmiştir.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Çalışma, probleme ilişkin literatür taraması, metodoloji ve uygulama kısımlarından oluşmaktadır. 1. ve 6. Bölümler sırasıyla giriş ve sonuç bölümleri olmak üzere, diğer bölümlerin içerikleri şu şekildedir: 2. Bölüm, literatürde yer alan araştırmaları genelden özele ve araştırma uygulamaları ile paralel bir ilerleme içerisinde sunarken, yapılan araştırmanın da literatüre katkısını ortaya koymaktadır. 3. Bölüm, optimum işletme yöntemi metodolojisini ve belirsizliğin dahil edildiği modelleme tekniğini detayları ile kavramsal olarak açıklamaktadır. 4. Bölüm su temini ve taşkın kontrolü gereken bir rezervuarda uygulama örneğini ve 5. Bölüm ise hidroelektrik üretim yapılan bir rezervuarda taşkın kontrolünü içermektedir. Çalışmanın, 2 – 5 bölümlerine ait detaylı içerik ise şu şekildedir:

2. Bölümde öncelikle rezervuar işletme çalışmaları açıklanmış, rezervuar elemanları tanıtılarak optimizasyon problemi ortaya konmuş, entegre rezervuar sisteminde geçerliliğini koruyan sorunlara değinilmiş ve zorluklar sıralanmıştır. Uzun ve kısa dönemli işletme çalışmaları, rehber eğri çıkarılması, çeşitli optimizasyon yaklaşımları aktarılarak gerçek zamanlı kısa dönem uygulama örnekleri sıralanmıştır. Sonrasında, tez çalışmasında kullanılan Model Önsezili Kontrol (MÖK)'nin gelişimi, özellikleri ve su kaynaklarındaki uygulamalarından bahsedilmiştir. Olasılık tahminlerin kontrolde kullanımları ve bu çalışmalarda gelinen nokta vurgulanmıştır. Çalışmada kullanılan Ağaç-Tabanlı MÖK (AT-MÖK)'ye giden yolda yapılanlar araştırmalar ve kullanılan yöntemin geçmişi de kısaca açıklanmıştır. En sonda ise, çalışma alanı olan Yuvacık Baraj rezervuarına ait geçmiş çalışmalar ve tezin literatürdeki yeri ve hedeflenen katkılar aktarılmıştır.

3. Bölüm yöntemlerin açıklandığı kısımdır. Burada, öncelikle matematiksel olarak bir rezervuar modeli, kısıtların gösterimi ve hidroelektrik üretim denklemleri açıklanır. Sonrasında gerçek zamanlı su kaynakları kontrol yöntemleri altında Geri Beslemeli Kontrol (GBK) ve MÖK ile bunların alt bileşenleri ve uygulamada kullanılan terminolojilerin açıklamaları mevcuttur. Hem tahmini girdilerin sentetik yöntemlerle üretilmeleri, hem de çoklu-aşama stokastik MÖK'ye nasıl geçildiği detayları ile açıklanmıştır. Ağaç Tabanlı azaltma yöntemi detayları sunulmuştur. Gerçek zamanlı kontrol modelinin tasarlandığı Flood Early Warning System (FEWS) kabuk yapısı, taşkın kontrol sistemini çalışmadaki önemi ve işleyişi sunulmuştur. Yine bu alt başlıkta, çalışmanın bel kemiği olan ve simülasyon ve optimizasyon modellerinin kurgulandığı RTC-Tools (Real-Time Control Tools, Gerçek Zamanlı Kontrol Aracı) yapısı, işleyişi ve matematiksel optimizasyon yöntemi detayları ile açıklanmıştır. Son olarak amaç fonksiyonu ve kısıtların türevlerinin hesaplanmasını sağlayan Adjoint modeli ve işlem ilgisi açıklanmıştır.

4. Bölümde; çok amaçlı gerçek bir rezervuar problemi örneği sunularak çözülmeye çalışılmıştır. İkinci olarak baraj işletme önceliklerinin ve kısıtlarının tanıtımı yapılmış ve model kurulumuna ait denklemler aktarılmıştır. Üçüncü kısım iki temel alt başlıktan oluşmaktadır. İlkinde günlük rehber eğrinin çıkarıldığı ve tahmin değerinin test edildiği günlük işletme modeli sonuçları sunulmuştur. Diğerinde ise saatlik işletme modeline geçilmesi ve bu modelde üç farklı tahmin verisi (mükemmel tahmin verisi, deterministik akım tahminleri ve olasılıklı akım tahminleri) ile yapılan testler anlatılmaktadır. Bu bölüm sonunda, gerçek zamanlı çoklu aşama stokastik optimizasyonu içeren ve tahmin belirsizliğini gözeten bir uygulama yapılmıştır. Ayrıca, su temini ve taşkın kontrolü sağlarken hatalı girdi verileri ile optimal bir kontrol nasıl sağlanır sorusuna da cevap aramaktadır.

5. Bölümde; bir önceki bölümde geliştirilen modele hidroelektrik santral eklenmesi durumunda saatlik MÖK'nin benzer üç farklı tahmin verisi ile sağladığı sonuçlar test edilmektedir. Böylece, çoklu amaca hizmet eden modelde hem enerjiden hem de su temini amaçlarından ödün vermeden taşkın kontrolüne varılabilirliği sorgulanmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

2. LİTERATÜR

Rüzgara ve güneşe bağlı varlıkların işletilmeleri doğrudan meteorolojik değişkenlere bağlı iken, suya dayalı varlıklar için karar problemi; gelecekteki su potansiyeli, mevcut depo hacmi, suyun çoklu kullanıcılar arasında etkili paylaşımı, taşkın yönetimi gibi farklı çevresel ve teknik kısıtlara bağlıdır. Rezervuarlar, depolamalı yapıları sayesinde işletimsel esneklik sağlamakta ve entegre su kaynakları işletmesinin önemli bir parçası olmaktadırlar. Genel olarak rezervuar sistemi; rezervuar, kanallar, tüneller, boru hatları, pompa (terfi) istasyonları, hidroelektrik santrali, sulama alanı, kentsel su temini sistemlerini içeren fiziksel bileşenlerden oluşur. Bu sistemler; içme ve sanayi kullanma suyu, hidroelektrik üretimi, taşkın kontrolü, sulama, rekreasyon, nehir taşımacılığı veya ekolojik gereklilikleri sağlamak üzere işletilirler (Rani ve Moreira, 2010).

İşletme problemi, birçok karmaşık değişken (örneğin; baraj giriş akımları, çıkış akımları, depolama, derive edilen akımlar, deşarjlar, havza içi su transferleri, sulama, sanayi ve içme-kullanma su ihtiyaçları) içermesinden dolayı, hem sistemlerin tasarlanması hem de gerçek zamanlı kullanımında karar verme süreci zorlayıcı bir görevdir.

Rezervuar sistem çalışmaları, planlama ve işletme modellerinin geliştirilmesini içermektedir. Planlama modelleri rezervuarın büyüklüğü, konumu ve rezervuar sayısını belirlemek için uzun vadeli bir işletme politikasını kapsarken, işletme modelleri ise mevcut rezervuar sistemlerinin işletme politikalarının oluşturulmasını ya da yeniden değerlendirilmesini içerir. Rezervuar sistemi bir kez planlandıktan sonra, sistemin performansının gerçek ihtiyaçları karşılaması için değerlendirmeler yapılmalı ve karar destek sistemleri geliştirilmelidir. Bir rezervuar sisteminde; işletme/planlama oluştururken hedefler, ihtiyaçlar ve fiziksel koşullar göz önünde bulundurulur. İşletmede varılmak istenen hedefler, sistem kütle denkliği ve diğer kısıtlar altında; yararları maksimize etmek, maliyeti minimize etmek, çeşitli ihtiyaçları karşılamak olarak sıralanabilir.

Enformatik, bilgisayar ve hidroloji bilimindeki gelişmelere rağmen, entegre rezervuar sistemleri hala çözülmesi gereken en temel sorunlardan biridir. Labadie (2004) sorunların kaynağını kısaca şu şekilde sıralamıştır:

- Sistem dinamik bir süreçtir.

- Doğrusal olmayan ve aynı zamanda konveks olmayan bir çözüm kümesi vardır.

- Yukarıda bahsedilen eleman ve değişkenlerden ötürü büyük ölçeklidir.

- Girdi değişkenleri çoğunlukla stokastiktir. Diğer bir ifade ile her zaman bir miktar rassallık ve belirsizlik içerir.

Bir su kaynakları sistemindeki toplam belirsizlik "Hidrolojik, hidrolik, yapısal ve ekonomik" olmak üzere dört alt kategoriye bölünebilir (Tung ve Mays, 1980). Bunların arasından, bu araştırma çalışmasında üzerinde durulacak olan hidrolojik belirsizlikleri açıklamak için üç ana başlık oluşturulabilir: doğal (inherent) belirsizlik, model ve parametre belirsizliği (Yanmaz, 2013). Doğal belirsizlik olayın rassal değişkenliğinden ötürüdür ve tamamen kontrol edilemez. Model belirsizliği fiziksel süreci (yağış-akış) temsil eden model denklemlerindeki yaklaşımlara ait belirsizliklerdir. Modelin iç yapısından kaynaklı belirsizlikler çoklu-model kullanımı ile çözülmeye çalışılmaktadır (Alvarado-Montero vd., 2017). Parametre belirsizliği ise denklemlerdeki katsayıların rasallığı ile ilintilidir.

İşletme çalışmalarında bu belirsizlikleri hesaba katan çözümler daha rasyonel çözümler üreteceğinden araştırma konuları bu yönde ilerlemektedir (Liu vd., 2012; Raso vd., 2014; Fan vd., 2016). Bu araştırmada, iki ana konu üzerinde durulmaktadır. Birincisi kısa dönemli optimal kontrol; ikincisi ise tahminlerdeki belirsizlik. Devam eden bölümlerde; bu konuların detayları genelden özele doğru aktarılmıştır. Bunun için öncelikli olarak işletme çalışmalarının mevcut durumlarının ne düzeyde olduğunun tespit edilmesi uygun olacaktır.

2.1. Uzun Dönem Planlama ve Kısa Dönem Optimum İşletme

Bir rezervuar sisteminin işletilmesi, depolanan suyun zaman içerisinde ne şekilde birikip boşaltılacağını belirleyen bir dizi karar gerektirir. İşletmeciler, birçok açıdan fayda sağlayacağı için (ya da diğer bir ifade ile sistemin hedeflerine katkıda bulunduğu için) suyun değerini en üst düzeyde tutmak isterler. Karar süreci, nehir akımlarının hem yıllar içinde hem de yıllar boyunca doğal akışlarındaki çeşitliliğini de gözetmelidir. İşletmeciler, gelecekteki ihtiyacı da gözeterek mevcut suyun anlık ve gelecekteki kullanımları arasındaki dengeyi sağlayacak bir karar politikası belirlemek durumundadır. Bu sebeple ıslak dönemlerde belirli bir seviyenin altına düşmemeyi tercih ederek, kuru dönemler için önlem alabilirler (Wan vd., 2016).

Rezervuar girdi ve çıktıları ile belirli depo hacminde bir kütle dengesi eşitliği yazılabilir. Bu rezervuarın bir simülasyonudur ve işletmecilerin de kolayca uygulayabileceği, farklı koşulları çeşitli senaryolar ve işletme stratejileri ile önceden deneyebileceği profesyonel bir çözüm sunar. Bu noktada, sıklıkla gelişen bilgisayar ve programlama teknolojileri kullanılarak hızlı ve entegre çözümler ile daha rasyonel kararlar üretilebilmektedir. Bir işletme çalışması; aynı zamanda farklı hedeflere bağlı olarak belirli amaç fonksiyonu ve çevresel-işletimsel kısıtları olan bir optimizasyon (en iyileme) problemidir. Simülasyon modellerinin optimizasyon metodları ile entegre bir şekilde uygulanmasındaki önemli bir aşama; kontrol değişkenleri (örneğin: rezervuar su seviyesi, taşkın kontrol noktalarındaki su seviyesi, rezervuar salınımları) kullanarak simülasyonu gerçekleştirilecek olan sistemin etkin bir şekilde havza ölçeğinde tanımlanması ve bunu takiben rezervuar işletmesinin farklı amaçlarını ortak bir paydada birleştirmeye yönelik optimizasyon hedeflerinin (örneğin: taşkın seviyeleri, su talepleri) belirlenmesidir.

Çoklu rezervuar sistemlerinin optimal işletmesi için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları genellikle Kapalı (Implicit) Stokastik Optimizasyon (KSO) ve Açık (Explicit) Stokastik Optimizasyon (ASO) olarak iki ana başlık altında incelenebilir (Labadie, 2004). KSO yöntemler genellikle girdi ve çıktıları tekil olan deterministik yaklaşımlı bir optimizasyonun uzun süreli hidrolojik gözlemlere uygulanması ve çeşitli yöntemlerle (regresyon gibi) optimal kuralların belirlenmesi olarak özetlenebilir. Burada; Doğrusal Programlama (Linear Programming), Şebeke Akış Optimizasyon Modelleri (Network Flow Optimization Models), Doğrusal Olmayan Programlama (Nonlinear Programming Models), Kesikli Dinamik Programlama (Discrete Dynamic Programming Models), Diferansiyel Dinamik Programlama (Differential Dynamic Programming Models) gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. Çeşitli metotlara ait karşılaştırmalı literatür değerlendirme çalışmaları için Yeh (1985), Labadie (2004), Rani ve Moreira (2010)'nın makaleleri incelenebilir.

ASO yöntemler ise akımlardaki stokastik yapının (rassallığın) deterministik zaman serileri yerine olasılıksal metotlarla tanımlanması şeklinde gerçekleştirilir. Amaç fonksiyonunda bu tanım beklenen değer operatörü ya da Markov karar teorisine bağlı geçiş olasılıkları ile gerçekleştirilir (Puterman, 2014). Bu, gelecekteki olayların mükemmel bir şekilde bilinemeyeceği varsayımı anlamına gelir. Baraj girdi akımları çeşitli olasılık dağılımları ile ifade edilirler. Burada ise frekans analiz yöntemleri ön plana

çıkmaktadır. Fakat bu yöntem çoklu sistemlerde matematiksel olarak çözüm zorluklarını içermektedir. ASO tekniklerde ise geçmişte; Şans Kısıtlı Programlama Modelleri (Chance-Constrained Programming Models), Stokastik Doğrusal Programlama Modelleri (Stochastic Linear Programming Models), Stokastik Dinamik Programlama Modelleri (Stochastic Dynamic Programming Models), Stokastik Optimal Kontrol Modelleri (Stochastic Optimal Control Models) gibi yöntemler uygulanmış ve çeşitli zorluklarla (boyut, amaç fonksiyonu, optimalite vb.) karşılaşılmıştır (Labadie, 2004).

Mevcut birçok rezervuar, geçmiş basit yöntemleri ve güncel olmayan teknikleri kullanarak, projelendirilmeleri esnasında öne sürülen kapasitesinin altında bir performansla işletilmektedir (WCD, 2000). Birçok araştırmacı da güncel olmayan teknikler ve yetersiz işletme poltikalarından bahsetmişlerdir (Tunçok, 2008; Li, Liu ve Chen, 2010; Şensoy, Uysal ve Şorman, 2016). Öte yandan, işletmeciler, hedef değerlere karar vermek için kişisel muhakemelerini de kullanmaktadırlar ve sonuçta alınan karar subjektif olmaktadır (Akter ve Simonovic, 2004).

İşletme çalışmalarında en yaygın durum işletme eğrisi (Rehber Eğri, RE) kullanılmasıdır (Oliveira ve Loucks, 1997; Chang, Cheng ve Chang, 2005; Liu vd., 2011). Bu eğriler uzun dönemli ya da kısa dönemli işletme için oluşturulabilir (Ahmadi, Hadda ve Mariño, 2014). Çoğunlukla aylık zaman ölçeğinde elde edilen bu eğriler oldukça detaylı simülasyon çalışmaları (Young, 1967) ya da çoğu zaman KSO veya ASO yöntemlerle (Oliveira ve Loucks, 1997) geçmiş döneme ait uzun zaman serili baraj giriş akımı verileri kullanılarak elde edilir. Bununla birlikte, uzun dönemli hedefleri sergileyen bu işletim stratejileri, kuraklık ve taşkın olayları gibi aşırı olayları yönetmek için yeterli olmayabilir (Rani ve Moreiara, 2010, Şensoy, Uysal ve Şorman, 2016). Ayrıca, geçmiş yıllarda çıkarılmış işletme eğrileri, güncel veri setleri ya da değişen ihtiyaçlara göre de güncellenmelidir.

Taşkın olayları kısa zamanda gelişerek işletmecilerin oldukça ani ve kritik kararlar almaklarını gerektiren özel bir durumdur. Maksimum işletme seviyesinde tutulan bir rezervuar risk yaratırken, ekstrem durumlar için sürekli bir boş hacim bırakılması ise bazen pratik değildir. Kaldı ki hangi taşkın riskine göre boş hacim bırakılması gerektiği de belirsizdir. Kısa dönemde giriş akımı değişikliklerine karşı, öncül deşarj politikaları gerekebilir. Öte yandan, olay sonrasında su temini ve hidroelektrik üretimi için uzun dönem hedeflerini sağlayacak depo seviyesine dönülmesi gerekmektedir. Bu açıdan kısa dönem işletme, gerçek zamanlı kontrol politikaları ve bunları gerçekleştirecek entegre

sistemlere ihtiyaç eskisinden daha fazladır. Modelleme ve dinamik yapıya bağlı yüksek boyut, doğrusal olmayan bir sistem ve konveks olmayan çözüm kümesi gibi nedenlerle sorun karmaşıklaştırça çözümü de karmaşıklaşarak global optimal çözüm bulmak neredeyse imkansız hale gelmektedir.

Kısa dönemli işletme, zamansal olarak ayrım yaklaşımı yapılarak sağlanabilir (Karamouz, Szidarovszky ve Zahraie, 2003). Uzun dönem optimizasyon sonuçları (RE gibi) sınır koşulları kabul edilerek, daha kısa zaman aralığında optimizasyon tabanlı işletme modeli kurgulanabilir. Kısa dönem işletme çalışmaları çoğunlukla baraj girdileri ile su ve enerji kaynaklı ihtiyaçların tahmin edilmesine dayanır. Bir su kaynağı sisteminde tahminler; dolusavak deşarjlarının minimize edilmesine, taşkınların daha iyi ve az zarar yaratacak şekilde yönetilmesine, su temini açısından daha güvenli politikalar belirlenmesine ve hidroelektrik üretiminde daha fazla düşü için etkili planlama yapılmasına, akımların daha yüksek olduğu zamanlarda daha fazla enerji üretimi yapacak kararlar alınmasına ve piyasa fiyatlarının arttığı zamanlarda hidroelektrik enerji üretimi yaparak daha fazla kar sağlamaya yarayabilir.

Literatürde, gerçek zamanlı rezervuar işletme çalışmaları oldukça farklı yaklaşımlarla birleştirilerek genelde mevcut işletme politikalarını iyileştirmek yönündedir. Chang ve Chang (2001) Tayvan'daki Shihmen rezervuarı işletmesi için yaptıkları çalışmada genetik algoritma ve bulanık denetim yöntemlerini birleştirerek; farklı giriş akımları ve rezervuar seviyesine göre optimal deşarjlar tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar mevcut subjektif işletme kurallarına göre üstün bulmuşlardır. Dubrovin, Jolma ve Turunen (2002) çoklu amaca yönelik işletilen Finlandiya'daki Paijanne rezervuarında gerçek zamanlı bir işletme için bulanık kural-tabanlı bir kontrol modeli geliştirmişlerdir. Havzada bulunan kar potansiyelinden ötürü kar su eşdeğeri, seviye ve gözlenen akım değerleri bulanık sisteme girdi sağlamış ve bulanık kurallar ile deşarj kararları verilmiştir. Fakat sistem geliştirilen hali ile aylık çalışmaktadır; ve akım tahminleri ile bütünleştirilmemiştir. Tayvan'daki Shihmen rezervuarı işletmesi için, Hsu and Wei (2007) şiddetli tropik fırtınalara karşı kullanılabilecek yağış tahmin modeli, akım tahmin modeli ve rezervuar optimizasyon modeli içeren gerçek-zamanlı bir rezervuar işletme sistemi modeli geliştirmişlerdir. Taşkın pikini azaltmak ve taşkın sonunda rezervuar hacmini optimize etmek üzerinde çalışılmıştır. Le Ngo vd. (2008) Vietnamdaki Kırmızı Nehir Havzası'nda bulunan Hoa Binh rezervuarının, rezervuar işletme kurallarının nehir modelleme sistemi ile entegrasyonu üzerine bir uygulamayı

aktarmaktadır. Karar ağacı şeklinde oluşturulan rezervuar işletmesinde yüzden fazla mantıksal sorgulamayı içeren bir rezervuar düzenleme stratejisini içermektedir. Çalışmanın amacı, rezervuarının taşkın kontrolü ve hidroelektrik üretimine göre mevcut regülasyonunu yeniden değerlendirmektir. Bir başka çalışmada, Kanada'daki Gatineau Nehri üzerindeki bir taşkın olayı esnasında, hidroelektrik üretimi için geliştirilen sistemde tahminlerin kullanılmasının ekonomik faydaları araştırılmıştır (Boucher vd., 2012). Farklı tahminler kullanarak; enerji, deşarj ve rezervuarın depolanma değişiminin karşılaştırması yapılmıştır. Ahmadi, Hadda ve Mariño (2014)'nun çalışmalarında genetik algoritma ile çoklu amaç optimizasyonu yaparak gerçek zamanlı işletme kuralları oluşturulmaktadır. Yaklaşım, çelişen amaçları eş zamanlı olarak ve tanımlanan iki performans kriteri (güvenilirlik ve hassasiyet) açısından hidroelektrik içeren bir rezervuarda test edilmektedir. Che ve Mays (2015) gerçek zamanlı bir rezervuar işletmesi için farklı entegre modeller ile karar destek sistemi geliştirmiştir. Burada, tahminlerdeki farklardan çok işletimsel açıdan modellerin entegrasyonu ve rezervuar deşarjlarının bir taşkın anında planlanması için çalışılmıştır.

Günümüzde, iklim değişikliğinin de sıcaklık, yağış rejimi, yeraltı su seviyesi ve yağış-akış gibi hidrolojik bileşenler üzerinde büyük bir etkisi vardır (Watts vd., 2015). Bu değişikliklerin (özellikle küresel ısınmanın) gelecekte kuraklık ve taşkın olaylarını arttıracağı düşünülmektedir (Giorgi vd., 2011). Bu sebeple, değişen çevresel koşullar altında karar verme sürecinde farklı hidrolojik koşulların gözetilmesi ve önceden tanımlanmış politikaların ise güncellenmesi gerekmektedir. Güncel çalışmalar, iklim değişikliğine bağlı belirsizliklerin su kaynakları yönetiminde göz önünde bulundurulmasının önemini vurgulamaktadır (Ahmad vd., 2014; Döll vd., 2015; Brookfield ve Gnau, 2016). Gelecekteki iklim senaryosu simülasyonlarının çoğuna göre Akdeniz havzalarında yıllık toplam yağışlarda azalma beklenirken yağışların daha şiddetli olacağı tahmin edilmektedir (Goubanova ve Li, 2007). Bu bölgede olan Türkiye'nin de yüzey sularında azalma beklenilmektedir (Yilmaz ve Yazicigil, 2011). Bazı iklim değişikliği simülasyon çalışmalarında Türkiye'nin özellikle batı ve güney bölgeleri için kış dönemindeki yağışlarında % 30'a kadar kritik bir düşüş olacağını belirtmektedir (Dalfes, Karaca ve Sen, 2007; Önol ve Semazzi, 2009; Göncü ve Albek, 2016). Bu çalışmaların dışında, hidrometeorolojik ve eğilim analiz çalışmalarına bakıldığında, benzer şekilde Türkiye'nin Batı Bölgeleri (Marmara ve Ege havzalarında)

için nehir akımlarındaki azalma dikkat çekmektedir (Cigizoglu, Bayazit ve Önöz, 2005; Sensoy, Demircan ve Alan, 2008; Aksoy vd., 2008).

Yukarıda açıklanan nedenlerden ötürü; i) rezervuarların gerçek zamanlı kontrolleri hala zorlayıcı bir görevdir, ii) işletimsel açıdan iyi bir işletme için uzun ve kısa dönem hedefler dikkate alınmalıdır, iii) gerçek zamanlı bir kontrol sürekli güncellenen ve girdi tahminlerini dikkate alan bir yapıda kurgulanmalıdır, iv) seçilecek optimizasyon ve kontrol yönteminin performansa etkisi düşünülmelidir, v) değişik koşulların olumsuz etkilerine karşı önleyici tedbirler alınması gerekebilir. Bu nedenlerle, Türkiye'de su kaynakları ile ilgili operasyonel çalışmaların yapılması ihtiyacı vardır. Bir sonraki bölümde literatürdeki gerçek zamanlı işletmenin dinamik yapısı ve gerçek zamanlı kontrol problemi irdelenmiştir.

2.2. Su Kaynakları Yönetiminde Kontrol Problemi

Gerçek zamanlı bir kontrol problemi; dinamik bir sistemin yanı sıra değişken başlangıç koşulları ve güncellenen girdileri ile adaptif bir süreci beraberinde getirir. Bu kısımda, dinamik bir sistem çözümüne, MÖK'nin gelişimine ve su kaynaklarındaki uygulamalarına kısaca değinilmiştir.

2.2.1. Dinamik sistem ve dinamik programlama (DP)

Genel olarak, rezervuar sistemlerinin işletilmesi, gelecek durum değişkeninin şimdiki durum değişkenine bağlı bir fonksiyonu olarak tanımlanmasından ötürü dinamik bir sistem problemi olarak ele alınır. Burada durum değişkeni genellikle rezervuar depo hacmidir. Ardışık karar süreçlerinin optimize edilmesi konusunda ön plana çıkan ve bir kilometre taşı olarak görülen yaklaşım Bellman (1954) tarafından geliştirilmiş olan Dinamik Programlama (DP) algoritmasıdır. DP'de ana problem çözülebilir alt-problemlere (stage, aşamalara) bölünerek ardışık bir şekilde ayrı ayrı çözülür. Bu yaklaşıma "böl-ve-fethet" felsefesi de denmektedir. Her bir aşama başlangıcında sistemin birden fazla durum değişkeni olabilir. Seçilen bir karar ile durum değişkeni diğer aşamaya taşınır. Genelde sondan başa doğru çözüm yaklaşımı ile her bir aşamada global optimum sonuç elde edilerek sonuçta problemin geneli için optimal çözüm elde edilir. Optimalite ilkesi, çözümün ana problem için en iyi sonucu vermesini sağlar. Fakat, bu hali ile çözüm yaklaşımı offline bir yaklaşımdır. Elde edilen sonuçları sistemde güncelleyecek ve yeni kararları sorgulayacak bir alt yapıdan yoksundur.

Doğrusal olmayan ilişkili ve konveks olamayan problemlerin çözümüne uygun olmasına rağmen, durum değişeni için bütün olası değerleri hesaplayarak büyük problemlerin çözümünde "boyutluluk sorunu, curse of dimensionality" olarak adlandırılan durumu ortaya çıkarmaktadır. Bunun anlamı; durum, kontrol (karar) ve girdi değişkenlerinin boyutunun artması ile işlem süresinin eksponansiyel olarak artmasıdır. Bir rezervuar sisteminde ardışık rezervuarlar gibi çok eleman olması ya da ASO'da olduğu gibi çoklu girdilerin kullanılması problemin boyutunu arttırarak hesaplama açısından zorlayıcı bir durum yaratır (Labadie, 2004; Yurtal, Seckin ve Ardiclioglu, 2005).

Labadie (2004), yakın geçmişte DP'nin bu sorununu aşmak için modelde yapılan değişiklikleri (geliştirilmiş farklı teknikleri) şu şekilde özetlemiştir. Bunlar: 1) Kaba Grid/İnterpolasyon (Coarse Grid/Interpolation) teknikler, 2) Dinamik Programlama Ardıl Yaklaşıklama (Dynamic Programming Successive Approximation) ve 3) Artımlı Dinamik Programlama (Incremental Dynamic Programming) ya da Kesikli Diferansiyel Programlama (Discrete Differential Dynamic Programming) gibi iyiletirilmiş DP çalışmalarıdır. Bu yaklaşımların da yetersiz kaldığı durumlar hala mevcuttur. Örneğin; 2. ve 3. metotlar yalnızca konveks problemlerde global optimum sonuçlar üretebilmektedir. DP'de diğer bir sorun ise çözüm yapısından ötürü amaç fonksiyonunun kesikli ve ayrılabilir bir şekilde tanımlanmasını gerekliliğidir. Bazı versiyonlarında ise amaç fonksiyonunun doğrusal olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu gibi durumlar ise "modelleme sorunu, curse of modelling" olarak adlandırılmaktadır (Raso, Malaterre ve Bader, 2017).

2.2.2. Model önsezili kontrol (MÖK)

Dinamik sistemlerin gerçek zamanlı optimal kontrolünde "Kontrol Teorisi" karşımıza çıkmaktadır. Adaptif (uyarlamalı) kontrol yöntemleri olarak da düşünülen çoğu kontrol yönteminde sistemde bir değişiklik meydana geldiğinde (hedef ve gözlem arası farklar) açığı kapatmak için kontrol kararı değiştirilir. Buna geri beslemeli bir süreç yönetimi de denebilir. Doğrusal Karesel Kontrol (Linear Quadratic Control), Kesikli-Zaman Optimal Kontrol (Discrete-Time Optimal Control) gibi farklı kontrol yöntemleri bulunmaktadır (Mehrmann, 1991; Zhou, Doyle ve Glover 1996). Yapısal olarak geri beslemeli süreç, bir optimizasyon modeli ile bütünleştirilir. DP'de bahsedildiği gibi problem çoğu zaman doğrusal değildir; çözüm kümesi konveks olmayabilir ve analitik

bir çözümü de olmayabilir. Bu aşamada, nümerik çözümlerin kullanımı ve yaygınlığı ön plana çıkar. Malaterre (2007) bunlardan en çok kullanılan bazılarını şu şekilde özetlemiştir: orantısal-integral-türev (Proportional-Integral-Derivative, PID) kontrol, önsezili kontrol (predictive control), bulanık (fuzzy) kontrol, yapay sinir ağı ile kontrol.

Bu çalışmada, çoklu değişken içeren kısıtlı kontrol problemlerinde kullanılan ve su kaynaklarında kullanımı görece daha yeni olan Model Önsezili Kontrol, MÖK (Model Predictive Control, MPC) tercih edilmiştir. Mayne vd. (2000) MÖK'nin tarihsel gelişimini irdelediğinde birden çok, farklı ve birbirinden bağımsız kolda gelişme tespit etmiştir. Bunun sebebi, yöntemin endüstrinin farklı alanlarında uygulamaya açık olmasıdır. Genelleştirilmiş önsezili kontrol literatürünü ise minimum varyans ve adaptif kontrol olarak görerek öncül çalışmaları aktarmışlardır. MÖK'nin teorik gelişimi ise; optimal kontrol problemleri çözümü, optimal çözümlerin karakterleri, optimal kontrol sisteminin Lyapunov dengesi, optimal geri beslemeli denetleyicilerin (controller) işlemsel algoritmaları ve optimal açık döngü kontrol terimleri ile bir bütündür.

Kontrol için her adımda, sistemin mevcut durumu ve belirlenen tahmin ufkunda gelecek öngörüsü ile optimizasyon yapılarak ilk kontrol kararı sisteme uygulanır (Mayne vd., 2000). MÖK, mevcut kontrol kararını on-line (her bir örneklem anı için azalan ufukta, *receding horizon*) sonlu ufuklu açık-döngü kontrol problemi olarak çözer. Yaklaşıma bağlı optimizasyonu formülleştirmek için girdi, durum ve çıktı üzerindeki kısıtlar açık şekilde göz önünde bulundurulabilir.

Özetlemek gerekirse günümüzde kullanılan hali ile MÖK (Morari ve Lee, 1999) şu ana bileşenlerle ifade edilmektedir: (1) sistem durumlarının sonlu bir kontrol ufkundaki gelecek durumlarını belirlemek için fiziksel süreç modeli, (2) amaç fonksiyonunu optimize eden kontrol dizisi hesaplanması, (3) azalan ufuk (receding horizon) stratejisi. On-line yapısı ile kısıtlı sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Bu açıdan da sıcaklık, basınç, hız gibi güvenlik kriterlerinin önem kazandığı kimyasal tesisler ve rafinerilerdeki proses endüstrilerinde 1980'lerden beri kullanılan gelişmiş bir süreç kontrol yöntemidir. Bu kontrol stratejisinin gerçek zamanlı bir su kaynakları işletmesindeki avantajı, yönetimin önsezili (öngörülü) diğer bir ifade ile proaktif olmasıdır (Zavala vd., 2009). Bundan kasıt, sistemi rahatsız edecek değişken (disturbance vector) gerçekleşmeden önce, kontrol sistemi bu durumu yönetebilecek kararları almaya çalışır. Buna örnek olarak, beklenen bir taşkın olayı gerçekleşmeden önce barajdan su bırakılması ve baraj seviyesin düşürülmesidir.

2.2.3. Su kaynakları kontrolünde MÖK uygulamaları

MÖK'nin su kaynakları sistemlerinde uygulanması ile ilgili en geniş çalışma ilk olarak bir doktora tez araştırması olarak van Overloop (2006) tarafından yapılmıştır. Geliştirilen MÖK ile drenaj ve sulama kanalları, pompa istasyonu denemeleri yapılmıştır. Fiziksel süreçlerde Integrator Delay ve Saint Venant modelleri simüle edilerek MÖK sonuçları basit geri beslemeli ve ileri beslemeli kontrol sistemleri ile karşılaştırılmıştır. MÖK'nin diğer metotlar kadar başarılı olduğu ve bunun yanında çelişen amaçlar içeren bir işletmedeki yeteneği de vurgulanmıştır. Ding ve Wang (2006) Saint-Venant denklemlerini adjoint modeli kullanarak optimizasyon algoritması ile birleştirmiş ve kompleks geometrili doğrusal olmayan açık kanallar için optimal akım kontrol metodu geliştirmişlerdir. Bu sayede taşkın kontrolü için farklı kontrol değişkenleri, kompleks akım durumları ve farklı kesitler için optimal çözüm elde edilir. Wahlin ve Clemmens (2006) yaptıkları çalışmada dallanan sulama kanal ağı için farklı bir otomatik kontrol yöntemi uygulamışlardır. Geliştirilen MÖK, doğrusal karesel düzenleyici teori (linear quadratic regulator theory) ile karşılaştırılmıştır. Blanco vd. (2010) Belçika'da Demer nehri taşkın problemi için doğrusal olmayan MÖK uygulaması yaparak mevcut kontrol yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. MÖK'nin mevcut durumda kullanılan 3-durumlu kontrolden daha üstün sonuçlar verdiği görülmüştür. Xu vd. (2010) su derinliği ve su kalitesi arasındaki ilişkiden yola çıkarak MÖK'yi su kalitesi yönetimi uygulamasında kullanmışlardır. Montero vd. (2013) MÖK'yi taşkın öteleme süreçlerini temsil etmek için basitleştirilmiş hidrolik modellere ait kontrol mekanizması uygulamasında kullanmışlardır. Aguilar vd. (2016) İspanya'da bulunan gerçek bir sulama kanalında MÖK kullanarak kontrol uygulaması yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, PID kontrol yöntemi ile karşılaştırıldığında MÖK'nin yönetimsel hedefleri yakalamak konusunda daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Bu uygulamalara rağmen, MÖK'de girdi tahminlerinin (disturbance vector) kullanılması (Bemporad ve Morari, 1999) güvenilir kararlar almayı engelleyebilir. Özellikle deterministik bir yaklaşımda ve tahminlerdeki belirsizliğin yüksek olduğu kısıtlı problemlerde hatalı kararlar alma riskini de beraberinde getirir.

2.3. Tahmin Belirsizliği ve Çoklu Akım Tahminleri

Günümüzde su kaynakları sistemlerinin gerçek zamanlı işletilmelerinde en büyük sorun tahmin belirsizliğinin gözetilmemesidir. Gelecek durumlar kesin bir şekilde bilinebilseydi aşılması gereken tek zorluk global optimal sonuçlar garanti eden bir optimizasyon problemi olurdu. Deterministik bir tahmini adapte edebilecek birçok matematiksel model geliştirilmiş ve uygulanmıştır (Yeh, 1985; Labadie, 2004; Rani ve Moreira, 2010). Rezervuarlara gelen akımlardaki tahmin belirsizliklerini gözetecek işletme model çalışmaları ise henüz oldukça sınırlı sayıdadır.

Gerçek zamanlı tahmin uygulamalarında, tahminler hatalı olabilir ve gerçek akımı olduğundan düşük veya fazla tahmin etme eğilimi gösterebilir (Zhao vd., 2013). Olası bir taşkın durumunda tahmin daha da fazla hata içerebilir ve bu hatadan tamamen kaçınmak imkansızdır (Li, vd., 2010). Karar sürecini güçleştiren hidrolojik tahmin belirsizliğinin kaynakları; kurgulanan hidrolojik tahmin modelinin yapısı (Chen, Brissette ve Leconte, 2011), havzadaki yağış miktarı gibi modele girdi olan değişkenlerdeki belirsizlikler (Roulin ve Vannitsem, 2005; Fan vd., 2016), model parametreleri (Kuczera ve Parent, 1998) ya da başlangıç koşullarıdır (Montero vd., 2016). Öte yandan, daha uzun tahmin ufku, daha fazla fakat daha az güvenilir tahminler getirerek işletme çalışmalarında çelişen bir durum yaratır (Simonovic ve Burn, 1989; Zhao, 2012).

Dünya'da ve Avrupa'da 2000'li yıllarda meydana gelen taşkınlardan sonra kısa dönem işletme için akım tahminlerinde belirsizlik içeren Olasılıklı Akım Tahminleri (OAT) üretimi gündeme gelmiştir. OAT'nin diğer bir adı da çoklu yapılarından ötürü ensemble (grup) tahminlerdir. OAT'ler, çoklu model uygulamaları, sayısal hava tahmin verisi tabanlı hidrolojik modeller, iklim modelleri çıktıları gibi birçok şekilde elde edilebilir. Bu konuda sayısal hava tahmin verileri kullanımı ile yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur ve tekil tahminlere kıyasla olasılıklı çoklu tahminlerin kullanımı artmaktadır (De Roo vd., 2003; Gouweleeuw vd., 2005; Johnell vd., 2007; Roulin ve Vannitsem, 2005; Roulin, 2006; Cloke ve Pappenberger, 2009).

Bu gelişmelere karşı; OAT'ye girdi olan sayısal hava tahmin verileri genellikle büyük baraj havzalarında test edilmektedir. Örnek olarak; Uysal vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada Fırat Nehri üzerindeki Keban barajını besleyen dağlık ve kar potansiyeli yüksek olan Karasu Havzası için geliştirilen Ensemble Prediction Systems (EPS) tabanlı hidrolojik tahmin sisteminde havza alanı 10,215 km^2'dir. Bir başka güncel uygulama yaklaşık 55,000 km^2 drenaj havzasına sahip; hidroelektrik ve taşkın koruma

amaçları ile işletilen Brezilya'daki Tres Marias rezervuarı için yapılmıştır (Fan vd., 2016). Öte yandan, küçük havzaları ve küçük nehirleri yönetirken belirsizlik çok daha fazla olmaktadır (Todini, 2004). Ayrıca, EPS verileri 10 – 15 günlük ileriye dönük veri sağladıklarından, tahmin üyeleri arası belirsizliğe bağlı saçılım genelde tipik bir EPS yapısında ilk 1-2 günden sonra başlamaktadır. Fan vd. (2016) çalışması incelendiğinde bazen 4-5 günden sonra başladığı ve havza karakteristiğine bağlı olduğu da görülebilir. Fakat, görece küçük bir havzada bu durum geç kalınmış bir karar politikası ile sonuçlanabilir. Benzer şekilde, Cloke ve Pappenberger (2009) düşük mekansal çözünürlüğü, sınırlı sayıda ensemble üyeye sahip olması, yanlılığı (bias) ve düşük dispersivite (underdispersivity) nedeniyle taşkın tahmin sistemlerini besleyen sayısal hava tahmin verisi tabanlı girdilerinin henüz yeterince tatmin edici olmadığını belirtmektedirler. Kısa zamanlı tahminler (saatlik) çoğunlukla bir günden az tahmin ufkuna ve kısmen kısa zaman aralığı olan her 3 saatte bir güncellenme zamanına sahiptir (Dietrich vd., 2009). Bu tahminler hala kısa tahmin ufkuyla kısıtlıdırlar (Wu ve Lin, 2017).

Çeşitli yaklaşımların yetersiz kaldığı durumlarda sentetik akım tahmin üretimi, rezervuar çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu konuda literatürde; Thomas-Fiering modeli (Zhao vd., 2011), Fraksiyonel Gauss gürültüsü modeli (Koutsoyiannis, 2002), yapay sinir ağları (Ahmed ve Sarma, 2007) ya da hibrit modeller (Ochoa-Rivera vd., 2002) gibi uygulanmış çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar arasında, sınırlı sayıdaki çalışma, gerçek zamanlı kısa dönem bir işletme için (i) gelecekteki dönemlerin daha büyük belirsizlik içereceği ve (ii) belirsizlikler arasında bir korelasyon olacağı şeklinde tahmini belirsizlik gelişim sürecini tanımlamaktadır. Bu araştırmada da görece küçük bir havza çalışıldığından ve saatlik verilere duyulan ihtiyaçtan sentetik yaklaşım ile çözüm arayışına gidilmiştir. Çalışmada kullanılan Deterministik Akım Tahminleri (DAT) ve OAT verileri de geliştirilen bir yöntemle sentetik olarak oluşturulmuş ve karar verme problemine girdi sağlamıştır. Yöntemsel detaylar, Bölüm 3 altında sunulmuştur.

2.4. Olasılık Tahminlerin Kontrolde Kullanımı

OAT'lerin karar mekanizmalarında kullanılmaları oldukça güncel bir sorundur. Labadie (2004) rezervuar sistemi işletmesindeki mevcut engellerden bahsettiği çalışmasında; optimizasyon modellerinde belirsizlik ve risk konularının dahil edilmesi

gereğini vurgulamaktadır. Bu sorun, hala güncelliğini korumaktadır. Schaake (2014) güncel teknoloji ürünü OAT'lerin karar verme yöntemlerinde kullanılmamasına dikkat çekmektedir. Kısa dönem gerçek zamanlı işletmede, OAT kullanarak tahmin belirsizliğinin göz önüne alınması bir çözüm olabilir.

Deterministik bir kontrol modeli tek bir girdi için optimum kontrol yörüngeleri ararken, stokastik karşıtları bütün ensemble (OAT üyeleri) için en uygun çözümü bulmaya çalışarak tahmin belirsizliğini de dahil ederler. Bununla birlikte, optimizasyon problemindeki kısıtlara ve artan değişken sayılarına bağlı boyut problemleri ile birlikte problem uygulanamaz bir çözüme gidebilir. Yakın geçmişte farklı araştırmacılar da bu konuya yönelerek, sınırlı sayıda çalışmada tahmin belirsizliğini hesaba katan sistemlerin performanslarının iyileştirilebileceğini göstermişlerdir (Kelman vd. 1990, Faber ve Stedinger, 2001; Yao ve Georgakakos, 2001; Kim et al., 2007; Zhao, Cai ve Yang, 2011; Ramos, Van Andel ve Pappenberger, 2013; Liu vd., 2015; Todini, 2017).

Kelman vd. (1990) stokastik DP'yi geliştirerek çoklu girdileri de hesaba katabilecek Sampling Stokastik Dinamik Programlama (SSDP)'yı önermiştir. SSDP, Stokastik Dinamik Programlamanın gelişmiş bir hali olmakla beraber mükemmel tahmin (perfect forecast) için akım tahminlerini deterministik optimizasyona dönüştürür. Metot daha sonraları geliştirilmiş, daha etkili hale getirilerek hızlandırılmıştır (Faber ve Stedinger, 2001; Kim et al., 2007), ama hala herhangi bir dinamik programlama metodunun en büyük dezavantajı olan çoklu-boyut sistemlerde boyut problemi ile karşılaşılır.

Yao ve Georgakakos (2001) Folsom Gölü (Kaliforniya) için entegre bir tahmini-karar sistemi geliştirilmiş ve rezervuar performansının, geçmiş ve gelecekteki iklim senaryoları altında çeşitli tahmin-yönetimi planlarına duyarlılığını değerlendirmişlerdir. Farklı akım tahminleri; işletimsel tahminler, geçmişteki analog ensemble tahminleri, hidrolojik ensemble tahminleri, Genel Sirkülasyon Modeli (Global Circulation Model) tabanlı hidrolojik ensemble tahminleri ve mükemmel tahminleri içermektedir. Çalışma sonunda vardıkları iki önemli çıkarıma göre; (i) güvenilir baraj giriş akım tahminlerinin ve adaptif karar sistemlerinin, rezervuar performansına büyük ölçüde fayda sağlayabileceği ve (ii) dinamik işletimsel prosedürlerinin, iklim değişikliğiyle başa çıkmada etkili olabileceğini göstermişlerdir.

Zhao, Cai ve Yang (2011) yaptıkları çalışmada akımlardaki tahmin belirsizliğinin gerçek zamanlı rezervuar işletmesindeki etkilerini incelemişlerdir. Bunun için bir deterministik ve iki farklı olasılıklı tahmin üreterek hipotetik bir rezervuar sisteminde

kullanmışlardır. Tahminler, farklı senaryolar ve Martingale tahmin evrim modeli ile üretilmiştir. Değerlendirmeler üç farklı işletme politikası ile yapılmıştır. Bunlar; simülasyon tabanlı standart işletme politikası, DP ve stokastik DP'dir. Çalışma sonucunda, tahmin belirsizliğinin artmasının işletme performansını düşürdüğü ve tahmin yapısının da işletme kararlarında etkili olduğu görülmüştür. Akımlardaki değişkenliğin ve rezervuar depolama kapasitesinin de çıktılardaki etkisi vurgulanmakla birlikte stokastik yaklaşımın mükemmel tahminli işletmeye daha yakın sonuçlar sergilediği görülmektedir.

Ramos, Van Andel ve Pappenberger (2013) olasılıklı tahminlerin daha iyi karar vermede etkili olup olmadığını incelemek için ilginç bir deney tasarlamışlardır. Avrupa Yer Bilimleri Birliği (European Geosciences Union) 2012 Genel toplantısında hidroloji oturumuna katılan 98 bilim insanına risk tabanlı kararlar almaları konusunda bir oyun oynatılmıştır. Çeşitli taşkın tahminleri bilgisine sahip karar vericilerin farklı kısıtlarda (taşkın koruma durumunda) eldeki verinin deterministik ya da olasılıklı olmasına göre yaklaşımları sorgulanarak analiz edilmiştir. Farklı karar sonuçlarının zarar durumundaki parasal değerleri dinleyicilere bildirilerek ardarda farklı hidrolojik koşullara karşı ne gibi kararlar sergileyecekleri sorgulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek belirsizlik olsa da karar vericiler tutucu bir yaklaşımda bulunarak şehri taşkından korumaya çalışmış ve belirsizliğin artması durumunda riskten kaçınma da artmıştır. Belirsizliğin olduğu tahminlerde kararların iyileştiği, buna karşı olmadığı durumda daha fazla riskin alınmak zorunda kalındığı görülmüştür. Ayrıca, ilginç olarak ardışık kararlarda bir önceki kararın ve eldeki zararın durumu bir sonraki kararda önemli rol oynamıştır. Yapılan deneyin diğer bir amacı da hidroloji komitesini olasılıklı tahminleri karar verme sürecinde daha çok değerlendirmeye ve kullanmaya yöneltmek ve bu esnada karşılaşılacak zorlukları aşmak için yeni fikirler çıkarmaya yönelik bir adım olarak da görülmüştür.

Liu vd. (2015) çalışmalarında, belirsizlik kaynaklarını analiz etmiş ve tahminlere dayalı rezervuar taşkın kontrolü sürecinde belirsizliğin miktarını hesaplamışlardır. Belirsizlik değerlendirmesi stokastik analiz ve rezervuar öteleme simülasyonlarının bir birleşimi olarak sunulmuştur. Bu sayede, pratikte kullanılabilir bir risk değerlendirme şeması önermişler ve ilgili risk inceleme problemleri için pratik bir çözüm ortaya çıkarılmıştır.

Todini (2017) güncel çalışmasında gerçek zamanlı taşkın tahmin sistemleri ve karar verme konusunda geçmişten günümüze bir değerlendirme yaparak olasılıklı tahminlerin

katkısını incelemiştir. Vardığı en genel kanı; taşkın uyarı ve taşkın yönetiminde olasılıklı tahminlerin (özellikle Bayes karar yaklaşımları ile bütünleştirilmiş şekilde) kullanıldığı çalışmaların rasyonel karar almada en uygun araçlar olduğudur. Fakat, çoğu taşkın riski ile karşı karşıya olan yöneticilerin karar verme sürecinde, doğru yöntemlerle belirsizliği hesaba katmanın öneminin ve katma değerinin farkında olmadığını da vurgulamaktadır.

Bu noktada, alternatif bir yaklaşım ise son zamanlarda ortaya atılan Çoklu (Multiple) MÖK olabilir. Van Overloop (2006) ve van Overloop Weijs ve Dijkstra (2008) ortalama, en iyi senaryo ve en kötü senaryo ile de denemeler yaparak stokastik konfigürasyonu basit bir şekilde tasarlayarak, deterministik metotlara kıyasla çeşitli iyileşmelerden bahsetmişlerdir. Fakat bu durumda da problem kontrol değişkenleri tek bir üye için optimum sonuç bulmaya zorlanır ve tahmindeki belirsizlik tam olarak hesaba katılmaz.

Bunun çözümü ise literatürde henüz çok yeni bir yaklaşım olan azaltılmış girdilerle çoklu-aşama stokastik optimizasyon kurgusu tasarlamaktır. Bu ise, girdi, durum ve kontrol değişkenlerinin bütünsel olarak çoklu olduğu çok sayıda değişken içererek çözülmesi uygulamada pratik olmayan bir yaklaşımdır. Bu noktada, yakın geçmişte deterministik optimizasyonun geliştirilmiş bir versiyonu olan senaryo ağaçlarını kullanan çoklu-aşama stokastik optimizasyonu dikkat çekmektedir (multi-stage stochastic optimization) (Growe-Kuska, Heitsch ve Romisch, 2003).

Raso vd. (2013) ensemble tahminlerden ağaç tabanlı azaltma yöntemi geliştirmiş ve kısa dönemli optimal uygulama maksatlı çoklu-aşama stokastik optimizasyonda adaptif bir şekilde kullanmışlardır (Raso vd. 2014). Bu yaklaşım Ağaç Tabanlı MÖK (AT-MÖK) olarak da adlandırılmaktadır. Yaklaşım çoklu olasılıklı üyeleri bir ağaç formuna dönüştürerek hem girdi, hem durum hem de kontrol değişkenleri için çoklu aşama çıktılar üretebilmektedir. Ayrıca ağaç yapısı da online bir sistemde ilk kontrol değişkeninin tekil olmasını sağlar. Optimizasyon açısından ise sonuçlar çoklu-MÖK'ye göre daha iyidir ve tahmin belirsizliği daha doğru bir formda göz önüne alınmıştır. Bu yaklaşım rezervuar sistemlerinin işletilmesinde oldukça yenidir ve bu konuda sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Stive, 2011; Raso vd., 2014; Schwanenberg vd., 2015b). Özellikle kapalı-döngü hindcast denemeleri ve bunların değerlendirilmeleri literatürde oldukça yenidir (Fan vd., 2016). Diğer yandan, ağaç üretimi optimizasyon performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bakımdan, tez araştırmasında en güncel yöntemlerden birisi olan olasılık korunumlu ağaç azaltma yöntemi seçilmiştir.

2.5. Uygulama Alanına ait Çalışmalar ve Tezin Literatürdeki Yeri

Bu kısımda kontrol yöntemleri için uygulama alanı olarak seçilen Yuvacık Barajı rezervuarında geçmişten günümüze yapılan çalışmalar sunularak; çalışmanın yeri ve bilimsel literatüre katkısı kısaca özetlenmiştir.

Kocaeli iline su temini amacıyla yapılan ve 1999 yılında işletmeye açılan Yuvacık Barajı'nda ilk yıllarda yapılan işletme çalışmaları Rao vd. (2001)'nin geliştirdiği aylık işletme eğrilerine dayanır. Bu eğriler, farklı baraj girdi akım senaryolarının dinamik optimizasyon ve yapay sinir ağları yöntemleri ile bütünleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Baraj, su temini için radyal kapak altında işletilerek farklı girdi akımları için anlık rezervuar seviyesine göre su kesintisi yüzdeleri önerilmiştir. Sonrasında, su temini ve taşkın kontrol için aylık RE'ler hazırlanmıştır (New Castle, 2001; Thames Water, 2001). Taşkın kontrol aylık RE'leri, dönemsel olarak beklenen farklı taşkın debileri için baraj seviyesinin ne kadar düşürülmesi gerektiğini göstermektedir. Su temini tabanlı RE'ler ise sürekli su temini için minimum, ortalama ve maksimum işletme seviyeleri önermektedir. Su temini ve taşkın kontrol gibi çoklu-amaca hizmet eden bu rezervuarda gerçek zamanlı işletme için her iki yaklaşımdan hangisine göre depolama yapılacağı bilinememektedir. Bu nedenle, su temini amaçlı RE'ler kuraklık zonları ve alarm seviyeleri olarak kullanılmaktadır. Daha sonra baraj işletmecileri, yaz aylarında kesintisiz bir şekilde su sağlayabilmek için kurak sezona girmeden önce baraj seviyesini en üst işletme kotunda tutmak için çeşitli yöntemler geliştirerek tecrübeye dayalı işletme kuralları oluşturmuşlardır. Bu durum, yağışlı dönemde radyal kapak arkasında da (dolusavak kret kotu üstü) depolamaya neden olduğu için mansap kanalında ve (belirli kanal kapasitesini aşarak) civarındaki sanayi bölgesinde taşkın riskini arttırdığından kısa vadeli kararlar için gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan bir araştırma projesi ile hidrolojik modelleme, akım tahmini ve rezervuar simülasyonlarını içeren gerçek zamanlı günlük bir karar destek sistemi geliştirilmiştir (TÜBİTAK Projesi, 109Y218). Bu çalışmalarda işletimsel açından sabit bir işletme eğrisi yerine havzanın hidro-meteorolojik durumuna göre değişen çeşitli kurallar ile kademeli bir depolama stratejisi geliştirilmiştir. Detaylı bilgi için projeye ait final raporu (Şensoy, 2012), yüksek lisans tez çalışması (Uysal, 2012) ve diğer uluslararası yayınlar (Uysal vd., 2016; Şensoy, Uysal ve Şorman, 2016) incelenebilir.

Çalışma alanı; çoklu amaca hizmet eden yapısı, zengin ölçüm ağı ve çevresel kısıtları ile yeni yöntemlerin geliştirilmesi, denenmesi ve uygulanması için güzel bir

örnek teşkil etmektedir. Geçmişte yapılan kural tabanlı yaklaşımlar (Uysal, 2012; Uysal vd., 2016; Şensoy, Uysal ve Şorman, 2016) katma değer sağlamakla birlikte optimizasyon tabanlı kontrol sistemleri hala geliştirmeye açıktır. Öte yandan, yeni gelişmekte olan akım tahmini belirsizliğini gözeten gerçek zamanlı kontrol sistemleri ülkemizde henüz uygulama yapılmamış bir alandır. Bu bağlamda tez araştırmasının literatüre katkıları birkaç açıdan ele alınabilir. Metodolojileri ve uygulamaları ilerleyen bölümlerde ele alınmak üzere bu katkılar aşağıda özetlenmiştir:

i. Taşkın ve su temini gözeten bir uygulamada RE çıkarılmasında MÖK'nin dahil olduğu KSO yaklaşımlar kullanılmıştır.
ii. RE'ler geri beslemeli simülasyon tabanlı bir sistemde farklı durumları (normal, kuraklık ve taşkın) için test edilmiştir.
iii. Gerçek zamanlı bir uygulama esas alınmış; uzun dönemli su temini politikası güden RE'ler ve kısa dönemli taşkın kontrol hedefleri bütünleştirilerek, MÖK ile günlük ve saatlik kontrol sitemleri geliştirilmiştir.
iv. MÖK sistemin dayanıklılığını ve güvenilirliğini etkileyen akım tahminlerdeki hata durumunu dikkate alan denemeler yapılmıştır.
v. Sentetik akım tahminleri üretimi için yeni bir yaklaşım sergilenmiştir.
vi. Çoklu-aşama stokastik model AT-MÖK'nin gerçek zamanlı saatlik rezervuar işletme kontrolü gerçekleştirilmiştir.
vii. AT-MÖK modeli, hidroelektrik enerji üretimi için de test edilmiştir.

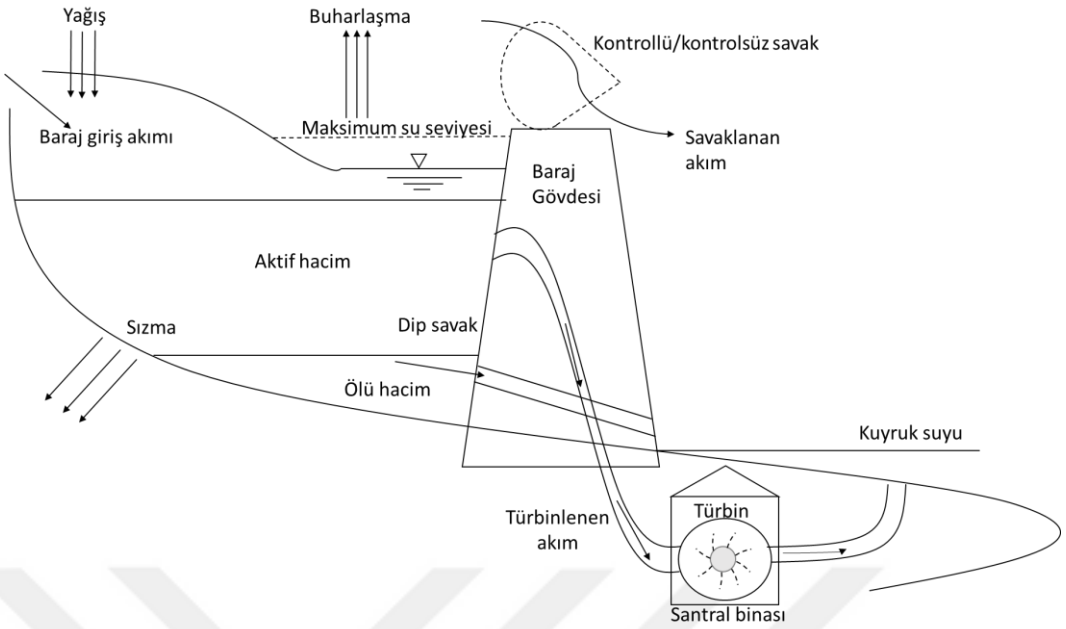
Bu hali ile çalışma hem gerçek bir işletme örneğinde denenerek çoklu amaca hizmet eden (su temini, taşkın kontrolü ve enerji üretimi) bir rezervuar sistemi için çözüm sunmuş hem de yayınlanan çeşitli çalışmalarla (Uysal vd., 2017a; Uysal vd., 2017b; Uysal vd., 2017c; Uysal vd., 2017d ve Uysal vd., 2017e) literatüre katkı sağlamıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. OPTİMUM İŞLETME VE BELİRSİZLİK

Ardışık kararlar bütünü "politika", önceden tanımlanmış kriterlere göre en avantajlı politika ise "optimum politika" olarak adlandırılmaktadır (Bellman, 1954). Su kaynakları yönetiminde, optimum politika ile işletme uygulaması yapmak nehir akımları ve taleplerin zamansal olarak değişkenliğinden ve belirsizliklerinden ötürü zorlayıcıdır. Öte yandan rezervuar sistemleri, sahip oldukları depolama hacmi ve çıkış yapıları ile kontrol edilebilir bir yönetime imkan vermektedir. Rezervuarın işletme çalışmaları ise, girdilerin ve çıktıların depolamaya ait süreklilik denklemlerinde çözümlerine dayanır. Bu denklemlerle oluşturulan modeller ile farklı girdiler (geçmiş veya gelecek senaryoları) farklı işletme politikalarıyla test edilerek çeşitli koşullara ait simülasyonlar (benzetimler) yapılabilir. Rezervuarın kullanım amaçlarına göre (su temini, taşkın kontrolü, hidroelektrik üretimi gibi) birbiri ile çelişen amaçların aynı anda en az kayıp ile sağlayan optimum kararların verilmesi gerekir. Bu nedenle de rezervuarda ne kadar su depolanacağı ya da kontrol edilen yapılardan ne kadar su bırakılacağı denklemdeki kontrol değişkenlerinin (diğer bir ifade ile optimizasyon parametrelerinin), matematiksel modeller yardımı ile çözülerek optimize edilmesi ile sağlanır. Bir optimizasyon modelinde ele alınan problem, amaç fonksiyonu (maksimize veya minimize edilerek), karar değişkenleri ve kısıtların bir bütünü olarak ifade edilir.

Rezervuar girdileri en genel haliyle; rezervuarı besleyen giriş akımları, yağış ve rezervuara başka kaynaktan yapılan derivasyonlar; rezervuardan çıkan akımları ise buharlaşma ve sızma kayıpları, sulama ve içme suyu, savaklanan taşkın suyu, doğal hayatın devamlılığını sağlayan can suyu, hidroelektrik enerji üretiminde kullanılan su olmak üzere çoğunlukla kontrollü ve kontrolsüz çıkış akımları oluşturur. Girdi ve çıktıların belirtildiği genel bir rezervuar sistemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu sistemler gerçek zamanlı uygulama örneklerinde, fazla miktarda ve zamansal olarak değişken birbiri ile ilişkili veri barındırmaktadır. Bu sebepten ötürü optimal kararların alınmasında, dinamik sistemlerin kompleks yapısını yansıtan ve doğru kararları tespit edecek kontrol modeli geliştirmek araştırma çalışmasının yöntemini oluşturmaktadır. Bu bölümde rezervuar model simülasyonu, optimizasyon modeli ve kontrol yöntemleri ele alınmıştır.



Şekil 3.1. *Rezervuar sistemi gösterimi*

Simülasyon ve optimizasyon modellerinin kurulumu için iki önemli öncelikli kısıt vardır. Bunlar; su bütçesi (süreklilik) denklemi ve fiziksel limitlerdir. Verilecek herhangi bir kararın (optimum ya da değil) mutlaka bu iki temel koşulu sağlaması gerekmektedir. Böylece fiziksel olarak tutarlı bir model kurgusu sağlanmış olur. Süreklilik denkleminde, bir sonraki adımda rezervuar hacmini hesaplamak için bir önceki adım durumu (durum değişkeni) ile girdiler ve çıktılar dikkate alınarak hesap yapılır. Tekil bir rezervuar için örnek bir süreklilik denklemi şu şekilde tanımlanabilir (Denklem 3.1):

$$s^k = s^{k-1} + \Delta t\left(Q_I^k - Qs^k - Q_{WS}^k - Qt^k - E^k\right) \tag{3.1}$$

Burada; s rezervuar hacmi (m^3), k zaman indisi (s), Δt k ile $(k-1)$ zaman aralıkları arasındaki süre (s), Q_I, Qs, Q_{ws}, Q_t ve E (m^3/s) sırasıyla rezervuar giriş akımı, dolusavak deşarjı, su temini için rezervuardan çekilen su, hidroelektrik üretimi için türbinden bırakılan su miktarı ve rezervuar yüzeyinde gerçekleşen buharlaşma miktarını göstermektedir. Sistemdeki fiziksel kısıtları tanımlamak için; kapasite eğrileri, deşarj limitleri ve rezervuar göl seviyeleri kullanılmaktadır. Bu kısıtlar simülasyonda çeşitli limit koşulları temsil ederler. Rezervuar seviyesi, H , ise Denklem (3.2) ile hesaplanır:

$$H^k = f_{ls}(s^k) \tag{3.2}$$

Burada; f_{ls} parçalı seviye-hacim eğri fonksiyonudur. Bu fonksiyon rezervuar su tutmadan önce hesaplanır ya da sonrasında batimetri çalışmaları ile sediment birikimine karşın güncellenebilir. Baraj gölünden deşarj amaçlı çıkış yapıları ise kontrollü veya kontrolsüz şekilde olabilir. Bu deşarjlar, yapıların fiziksel kapasitelerine göre değişeceğinden (kısıtlanacağından) deşarj eğrilerinin tanımlanması gerekmektedir.

Burada, kontrolü zorlaştıran durum dolusavak deşarjı (Q_s) veya türbinlenen akım (Q_T) gibi yönetici kararına bağlı değişkenlerin ne olacağının önceden bilinememesidir. Çoğu zaman optimizasyon probleminde kontrol değişkenlerini bu iki değişken oluşturur. Kontrollü dolusavak deşarjları parçalı doğrusal deşarj eğrisi (Qs_{ls}) ile tanımlanabildiğinden, herhangi bir seviye için fiziksel koşullara bağlı kabul edilebilir maksimum deşarj Denklem 3.3'te gösterilmiştir:

$$Qs_{mak}^{k} = Qs_{ls}(H^{k}) \tag{3.3}$$

Burada; Qs_{mak}^{k} maksimum fiziksel dolusavak deşarjı (m^3/s), Qs_{ls} parçalı doğrusal deşarj eğrisi fonksiyonudur. Kısaca, deşarj edilen akımın da yönetim esnasında rezervuar seviyesine bağlı fiziksel bir maksimum limiti vardır.

Bunların dışında, minimum ve maksimum rezervuar seviyeleri, türbinlenen deşarj gibi başka durum ve optimizasyon değişkenlerine bağlı kısıtlar simülasyon modelinde kurallar ile optimizasyon modelinde ise amaç fonksiyonu ya da ek kısıtlar olarak tanımlanmaktadır.

Hidrogüç Üretim Formülasyonu:

Hidrogüç, hareket halindeki sudan ve düşeydeki düşü farkından yararlanarak türbinler aracılığıyla elde edilen güçtür. Çalışmanın ikinci uygulama kısmında hidroelektrik üretimi hesaba katıldığından, bu bölümde kısaca hidroelektrik üretimi formülasyonu Denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$P^{k} = \rho g H_{sy}^{k} Q_{t}^{k} \eta \tag{3.4}$$

Burada; P güç üretimi (Watt), ρ suyun yoğunluğu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), H_{sy} rezervuar seviyesi ve kuyruksuyu kotu arasındaki fark ya da diğer bir ifade ile su yükü (m), Q_t (m^3/s) türbinlerden geçen debi miktarı ve η hidroelektrik santralin verimliliğidir. Burada verimlilik, Denklem 3.5'te gösterildiği gibi çeşitli kayıplara bağlı genel toplam bir ifadedir ve alt bileşenler ile hesaplanabilir.

$$\eta = \eta_H \eta_T \eta_G \eta_{TR} \quad (3.5)$$

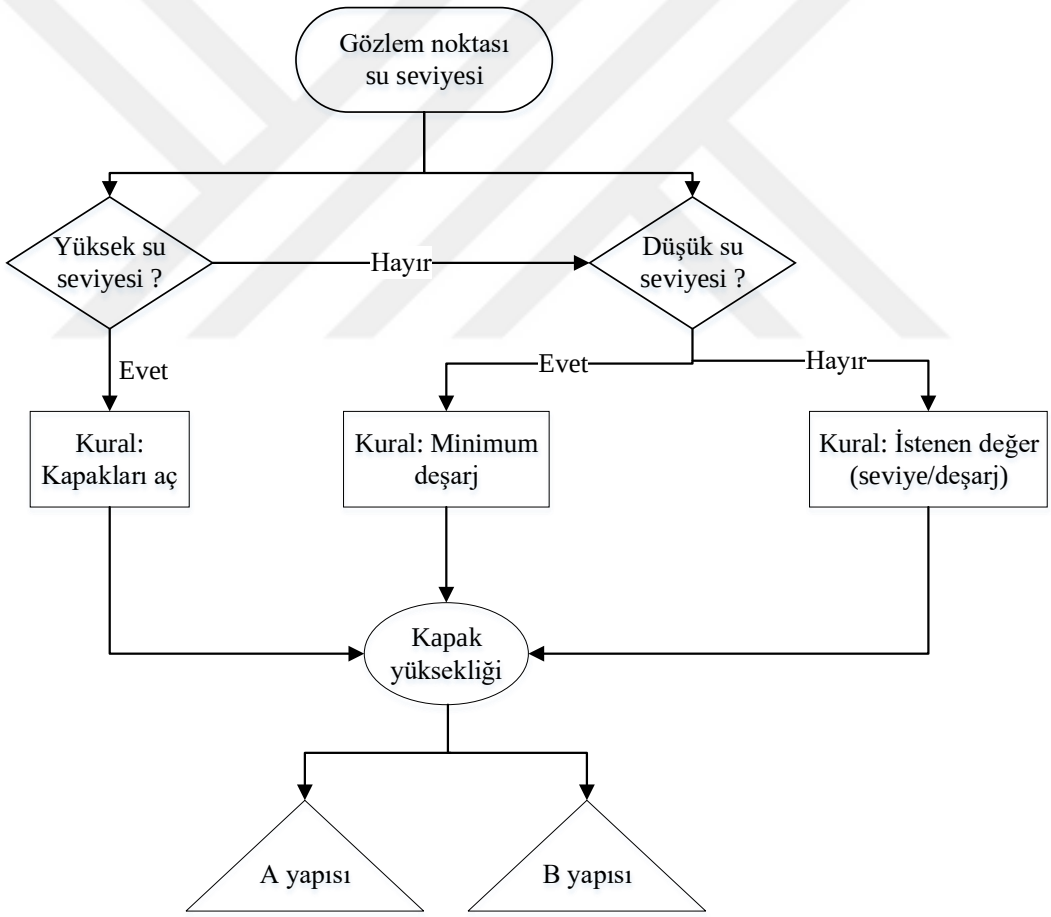
Burada; $\eta_H$yük kaybına bağlı hidrolik kayıplardan dolayı hidrolik verimlilik, η_T tübin verimliliği, η_G jeneratör verimliliği, η_{TR} transformatör verimliliğidir.

3.1. Gerçek Zamanlı Su Kaynakları Kontrol Yöntemleri

Dinamik sistemler, zamansal olarak durağan olmayan, şimdiki durum değişkenlerinin önceki durum değişkenlerinin fonsiyonu olduğu sistemler olarak ifade edilebilirler. Bu sistemlerde, daha önce Denklem 3.1'de tanımlandığı gibi ölçülen başlangıç koşulları ve modeller (sistemin analitik çözümü) ile sistemin bir sonraki zaman aralığındaki durumu hesaplanabilir. Bu bakış, yeterli ölçüm ve doğru formülasyonların tanımlanması durumunda herhangi bir andaki durumun tespit edilebileceğini öngören deterministik bir bakış açısını da ortaya koymaktadır. Bu sistemlerin yönetilmelerinde de kontrol tekniklerinden faydalanılabilir. Kontrol yöntemlerinde, gerçek zamanlı bir işletme karar süreci çeşitli şekillerde kurgulanabilir. Dinamik bir süreç, zamansal olarak durum ve kontrol değişkenlerini içermektedir. Kontrol teorisi, mühendislikte (endüstriyel süreçler, otomasyon sistemleri vb.) çokça uygulaması olan gelişmiş bir matematik disiplinidir ve bazen "optimal kontrol yöntemi" olarak da adlandırılır.

İşletme politikası (yönetim kontrolü) klasik yaklaşımda Geri Beslemeli (GB), İleri Beslemeli (İB) veya her ikisinin de birlikte kullanıldığı şekillerde olabildiği gibi son yıllarda öne çıkan Önsezili Kontrol (ÖK) yaklaşımları ile de gerçekleştirilebilir. Klasik Beslemeli Kontrol Sistemleri (BKS) model kurulumu açısından daha kolaydır ve kural tabanlı bir yaklaşımla simülasyonu yapılmış bir sistemde test edilebilir. Örnek bir kural tabanlı GBK yaklaşımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Burada, olası tüm aksiyonları önceden belirleyerek gerçek zamanlı işletme politikası uygulanabilir. Reaktif kontrol olarak da adlandırılan bu sistemler kontrol hatalarına (hedeflenen ve gözlenen seviye arası farklar gibi) bağlı düzeltmelerle karar vermeye yardımcı olurlar. Fakat, zamansal olarak ileriye dönük bilgileri (baraja girmesi beklenen akım gibi) doğrudan bir optimizasyon algoritmasına dahil etmezler ve bu sebeple de her zaman optimumu da garanti edemezler. Öte yandan, ÖK stratejileri ise proaktif kontrol olarak da adlandırılarak gelecek durum tahminlerini optimizasyon kurulumu içine katarak mevcut zaman adımı için ileriyi de gözeten bir optimum politika oluşturmayı hedefler. Sistemin en iyi şekilde yönetilmesi için bir amaç fonksiyonu tanımlamak gerekmektedir. Amaç fonksiyonu farklı hedefleri

gözeten bir yapıda çeşitli değişkenlerin bir fonksiyonu ya da fonksiyonlar toplamı olarak oluşturulabilir. Bu noktada, model geliştiricinin deneyimi ve problemi algılayışının da sorunun çözümünde farklı sonuçlar elde edilmesine neden olabileceği unutulmamalıdır. Problem çözümü optimumu hedeflese de amaç fonksiyonu kullanıcı tabanlıdır. Amaç fonksiyonundaki yanlış veya eksik bir kurgu yetersiz performans sergileyen kararlara yol açabilir. Ortaya konan optimizasyon problemi bir çözüm (solver) algoritması ile bütünleşik şekilde çözülür ve kontrol değişkenleri için sistemi optimal yönetecek kararlar alınabilir. ÖK'ün bu sebeplerle erken karar verme ve zararları önceden görerek azaltma imkanı vardır. Bunun yanı sıra, proaktif bir kontrolde de yanlış bir tahmini girdi ile yanlış karar alma riski bulunmaktadır. Bu çalışmada, hem amaç fonksiyonu geliştirilmiş; hem de girdi durumlarındaki değişikliklerin etkisi (tahmin belirsizliği) incelenmiştir.



Şekil 3.2. *Bir GBK işletim örneği (Schwanenberg ve Becker, 2009)*

Uygulamacılar ve model geliştiriciler, (uygulamalarda) her zaman en basit çözümü arayarak, karmaşık çözüm yöntemlerinden uzak durmayı tercih ederler. Bu açıdan, bu araştırmada da benzer bir yaklaşımla; basitten karmaşığa bir karar destek sistemi

geliştirilmesi adımları izlenmiş ve her iki kontrol (geri beslemeli ve önsezili) yöntemi açısından değerlendirme yapılmıştır.

3.1.1. Geri beslemeli kontrol (GBK)

Baraj işletme sisteminde GBK, farklı kuralların süreklilik denklemleri (Denklem 3.1) ile bütünleştirilmesi ile kurulabilir. Rezervuar seviyesinin sürekli olarak gözlendiği bir sistemde, hedeflenen seviyeden sapmalara (hatalara) dayalı bir kontrol mekanizması geliştirilir. Bu amaçla, GBK yönteminde Rehber Eğri (RE, Guide Curve) olarak adlandırılan hedef seviye, deşarj kısıtları ve fiziksel sistem kısıtları vb. ile karar verme mekanizmasında rol oynar. RE'nin halihazırda işletmecinin kullanımına hazır olduğu kabul edilirse; en basit olarak, depolama hedefi RE ile sağlanırken bir "*kural*" ile de ne kadar suyun hangi elemandan deşarj edileceği kontrol sistemine (modele) tanımlanır. Kurallar arası organizasyon ise "*eğer-öyleyse-değilse yapısı*" gibi mantıksal ifadeler ile belirlenir. Örneğin; "eğer mansap akımları x değerini geçerse enerji üretimi için deşarj yapmayı bırak" ya da "eğer giriş akımları y değerini geçerse z kadar dolusavak deşarjı yap" gibi yapılardır. Bu mantıksal kurallar da kendi içlerinde mevcut koşullara, ihtiyaçlara ve kontrol noktalarına göre önceliklendirilebilir. Bu araştırmada, GBK uygulama kısmında çeşitli kurallar tanımlanarak rezervuar seviyesi istenilen RE'de tutulmaya çalışılmış ve fazla su dolusavak yardımı ile mansap kanalına deşarj edilmiştir. Su temini ve taşkın kontrolü durumunda iki temel kural ile hareket edilmiştir: (i) birinci olarak, şehre ihtiyacı kadar su sağlanması, ve (ii) ikinci olarak dolusavak deşarjlarının, mansap kanalı limitlerini geçmeyecek şekilde "maximum deşarj limit" kuralları ile kısıtlanmasıdır. Bu durumda, model RE ve dolusavak deşarj eğrilerini kullanarak karar verir (örneğin, eğer mevcut rezervuar seviyesi RE'den büyükse "RE'ye geri getirecek miktarda deşarj"; değilse "deşarj yok" kararı alınır):

$$Qs^k = \begin{cases} \dfrac{s_{RE} - s^{k-1}}{\Delta t} & eğer \quad H^k \geq RE \\ 0 & eğer \quad H^k < RE \end{cases} \tag{3.6}$$

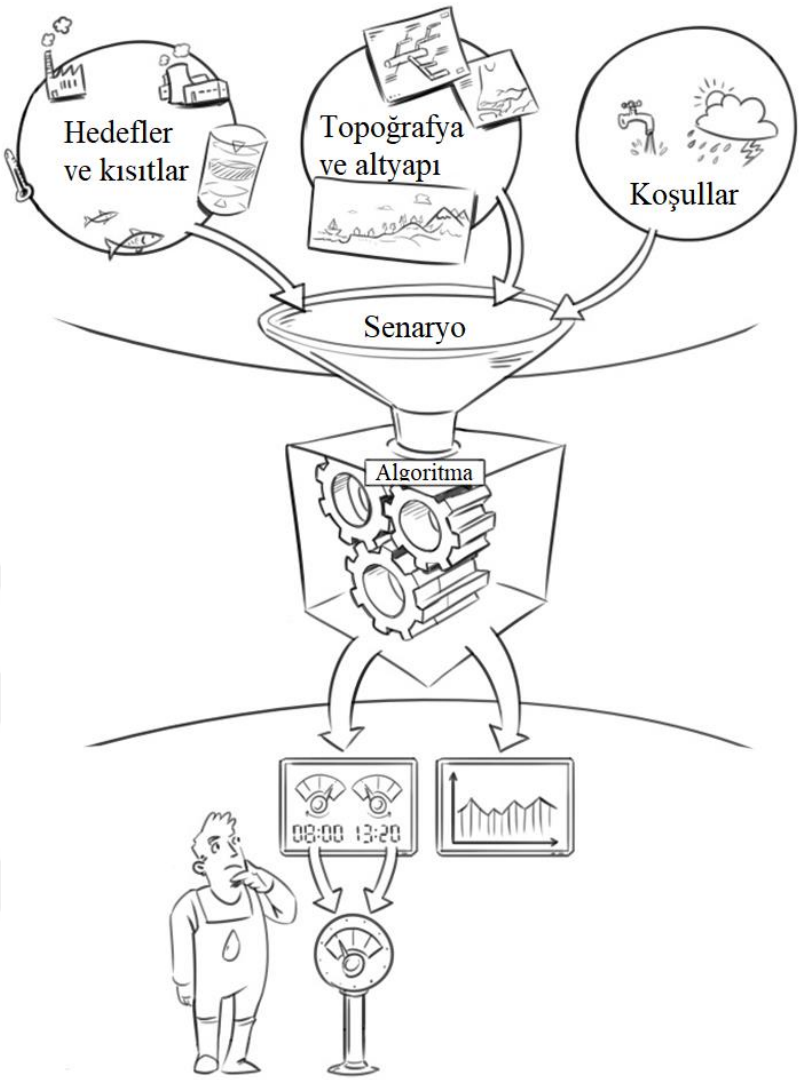
Burada; Qs^k k anında dolusavaktan deşarj edilecek su miktarı (m^3/s), s_{RE} RE'ye denk gelen depolama hacmi (m^3), H^kise k anında rezervuar seviyesidir (m).

3.1.2. Model önsezili kontrol (MÖK)

Kısa dönem işletme çalışmalarında GBK gibi kontrol yöntemleri sistemin anlık durum değişkenine bağlı kararlar alınması nedeniyle tüm süreç yönetiminde (belirli bir zaman ufkunda) hatalı kararların ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle ekstrem olaylarda daha kritik hatalara ve telafisi mümkün olmayan durumlara yol açabilir. Örneğin, bir taşkın durumunda gelmesi beklenen akımlar önceden bilinmediğinden rezervuar depo hacmi yeterince etkili kullanılmaz. Buna karşın önsezili modeller, sistemin gelecek davranışının mevcut kontrol değişkenine etkisini de içerecek şekilde çözüm sunabilmektedir. Örneğin, tahmini baraj akım girdileri kullanılarak uygun miktarda öncül deşarjlar yapılması ve hatalardan daha az etkilenen (robust) kararlar alınması sağlanabilir. Bu karara varabilmek için kullanılacak bir Model Önsezili Kontrol (MÖK) (Model Predictive Control, MPC) Şekil 3.3'te gösterilen ve aşağıda özetlenen şekilde farklı bileşenleri içerir:

- Kontrol politikası (ne zaman, ne hedefleniyor?), diğer bir ifade ile amaç fonsiyonu ve kısıtları belirlenmiş bir optimizasyon probleminin tanımı,
- Güvenilir bir sistem tahmin modeli,
- Senaryo (başlangıç koşulları, akım girdi zaman serileri vb.).

Bu bileşenler kullanılarak amaç; sistem tahmin modeli, optimizasyon algoritması ve kısıtlamalar ışığında, verilen senaryodaki sonlu bir tahmin ufku için optimum kontrol değişkeni değerlerini bulmaktır.



Şekil 3.3. *MÖK'ün temsili bir anlatımı* (*Schwanenberg ve Becker, 2009)*

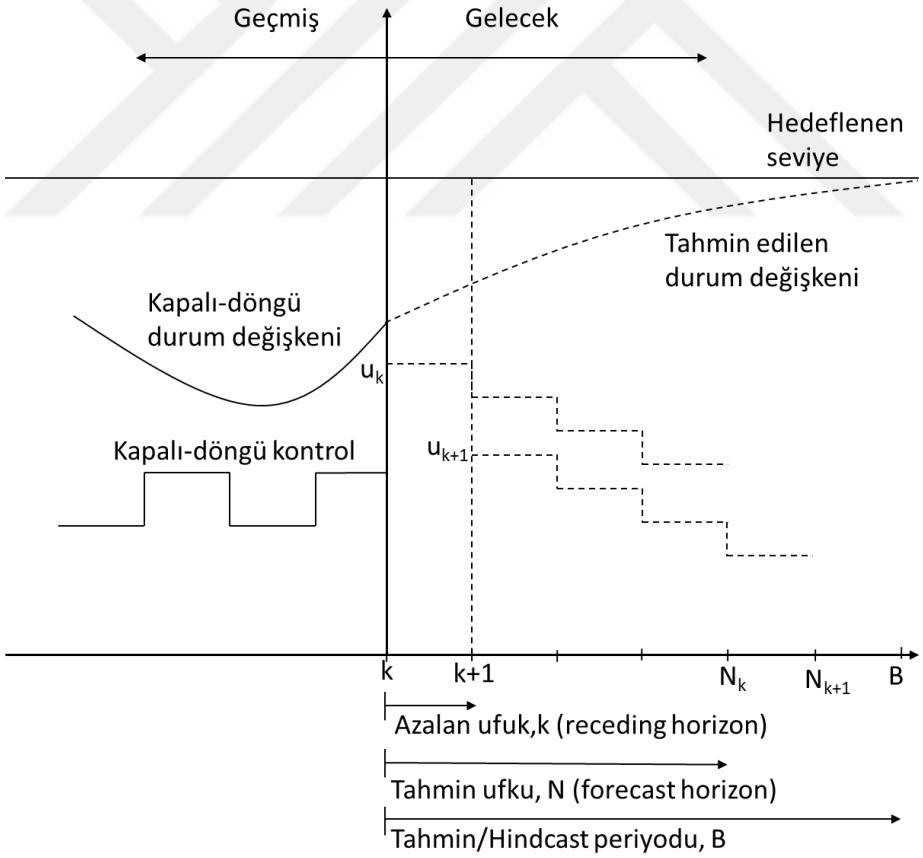
Bu bileşenlerle önceden belirlenmiş sonlu tahmin ufku (forecast horizon) için yapılan uygulama açık-döngü (open-loop) optimizasyon olarak adlandırılır. Modelin gerçek zamanlı dinamik bir kontrol modeli yani MÖK olması için güncellenen veriler ile beslenen ardışık açık-döngü optimizasyonların belirli aralıklarla (azalan ufuk) tekrar etmesi gerekmektedir. Bu yöntem kapalı-döngü (closed-loop) optimizasyon olarak adlandırılır. Kapalı döngüde, kontrol ve durum değişkenleri bir sonraki adımda başlangıç koşulları olarak kullanılır. Şekil 3.4'te gösterilen yaklaşımı kısaca maddeleştirmek gerekirse, MÖK;

i. Her bir tekrarlama zaman aralığında (azalan ufuk), belirli tahmin ufku için ve beklenen girdi akımlarına göre açık-döngü optimizasyon yaparak kontrol değişkenlerini tespit eder.

ii. Elde edilen optimum kontrol dizinin birincisi sisteme bir simülasyon modeli ile uygulanır. Simülasyon modelinde kararlar bir önceki optimum sonuçlardan alınırken girdileri gözlenen akımlar oluşturur.

iii. Bir sonraki zaman adımı başlangıç durumu için simülasyon sonucu durum değişkeni kullanılır ve tekrar birinci aşamaya dönülerek işlemler tekrarlanır.

Bu sebeplerle, MÖK'nin literatürde Dinamik Matris Kontrol (Dynamical Matrix Control), Genelleştirilmiş Önsezili Kontrol (Generalized Predictive Control), Azalan Ufuk Kontrol (Receding Horizon Control), Dönen Ufuklu Planlama (Rolling Horizon Planning) olarak da adlandırılmaktadır. MÖK'de geçerli kontrol eylemi, bu yapı sayesinde, optimum kontrol yasasının tüm durumlar için off-line olarak hesaplandığı Dinamik Programlama'dan (DP) (Bellman, 1954) farklı olarak; başlangıç durumu güncel veriye göre sistemin mevcut durumu olan on-line bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 3.4 *MÖK'nin dinamik çalışma prensibi*

(u_k:k anındaki optimal kontrol yörüngesi, u_{k+1}: k+1 anındaki yeni-optimal kontrol yörüngesi)

Özet olarak, çalışılan bir MÖK simülasyon periyodu (tüm tahmin süreci) denemesi tahmin ufku (forecast horizon) ve azalan ufuk (receding horizon) seçilmiş açık döngü optimizasyonlardan oluşmaktadır. Bu çalışmada, açık döngü optimizasyon uzun dönem işletme politikalarının belirlenmesi amacıyla uzun yıllar veri ile yapılan optimizasyonlarda, kapalı döngü optimizasyon ise hindcast de denilen geçmişe yönelik gerçek zamanlı kontrol denemelerinde kullanılmıştır. Modellerin kurgulanması ve konfigürasyonları, veri ve model yoğun dinamik süreç simülasyonları olduğundan; gerçek zamanlı işletme için ayrıca bir ara yazılım sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, çalışmada Deltares tarafından geliştirilen Flood Early Warning System (FEWS) platformu (karar destek sistemi) (Werner vd., 2013) kullanılmıştır. Bu platforma ait detaylar Bölüm 3.5'te detaylandırılmıştır. Bir sonraki kısımda deterministik bir MÖK'nin dinamik sistemde kurulumu (eşitlik ve eşitsizlik ilişkileri) aktarılmıştır.

3.2. Deterministik Model Önsezili Kontrolü

Deterministik bir sistemde, sistemin gelecek durumunun şu andaki durumunun sonucu olduğu ve aynı zamanda bütün değişkenlerin doğru (ölçülebilir) olduğu kabul edilir. Bu açıdan, optimizasyon algoritmasına güvenildiği sürece girdiler ve çıktılar kesin ve öngörülebilirdir. Model değişkenleri ise tekil zaman serileri ile ifade edilebilir. MÖK genel olarak azalan bir ufuk stratejisi ile ileriye doğru optimizasyon algoritması, düzensizliği (*disturbance*, burada baraj sistemine giren akımlar) ve çeşitli çevresel kısıtları bütünleştirerek su temini, taşkın öteleme, nehir taşımacılığı, hidroelektrik üretimi gibi amaçları sağlayabilir. Kesikli zaman-dinamik bir sistem için deterministik MÖK aşağıdaki şekilde durum ve bağımlı değişken hesabı yapar (Schwanenberg, Becker ve Xu, 2015):

$$x^k = f(x^{k-1}, x^k, u^k, d^k) \tag{3.7}$$

$$y^k = g(x^k, u^k, d^k) \tag{3.8}$$

Burada sırasıyla; x^k, y^k, u^k, d^k durum değişkeni, bağımlı değişken, kontrol değişkeni ve düzensizlik (disturbance) vektörlerini ve $f()$, $g()$ fonksiyonları rasgele doğrusal veya doğrusal olmayan su kaynakları modellerini ifade eder. Denklemlerin (3.7) ve (3.8) MÖK'de uygulanması durumunda, bir optimizasyon algoritması kontrol değişkenlerinin (u) en iyi kümesini belirlemek için $k = 1, \dots, N$ zamanı anlarına göre sonlu bir zaman ufkunda durum değişkeni x ve bağımlı değişken y'nin gelecek

yörüngelerini tahmin etmek için kullanılır. Zaman ufukta ilerledikçe, örneğin $\{d^k\}_1^N$ rezervuara giren akımlar gibi düzensizlik d'nin bilinmesi kabulünde, eşzamanlı (simultaneous/collocated) MÖK versiyonu şu şekildedir:

$$\underset{u,x,y \ \in \{0,\dots,T\}}{min} \sum_{k=1}^{N} J(x^k, u^k, d^k) + E(x^N, u^N, d^k) \tag{3.9}$$

$$kısıtlar\ altında: h(x^k, y^k, u^k, d^k) \leq 0, \quad k = 1, \dots, N \tag{3.10}$$

$$x^k - f(x^{k-1}, x^k, u^k, d^k) = 0 \tag{3.11}$$

Burada, sırasıyla $J()$ her durum geçişi ile ilişkili bir amaç fonksiyonunu, $E()$ son duruma ilişkin ek bir amaç fonksiyonunu ve $h()$ ise kontrol değişkenleri ve durumlar üzerindeki sıkı (hard) kısıtları ifade eder.

İlgili süreç (kütle dengesi) modeli (Denklem 3.7) her bir zaman aralığında tekrar yazılarak Denklem 3.11'de optimizasyon probleminin bir eşitlik kısıtı olur. Bu çalışmada optimizasyon problemi (amaç fonsiyonu, eşitlikler ve eşitsizlikler) doğrusal olmayan optimizasyon yaklaşımı altında (IPOPT yöntemi kullanılarak) (Wächter ve Biegler 2006) HSL kütüphanesinden MA27 çözücüsü ile çözülmüştür. Modelin kendisi RTC-Tools açık kodlu yazılımına entegre edilmiştir (Schwanenberg, Becker ve Xu, 2015). Eğer kontrol değişkenleri sürekli ise, IPOPT gibi doğrusal olmayan programlamada performansı arttırmak için, kontrol değişkenleri (u) ve durum değişkeni (x) ile kısıtların amaç fonksiyonun Jacobi matrisine göre türevleri $dJ = (x^k, u^k, d^k)/du^k$ sağlanabilir. Bu türevlerin etkili bir şekilde hesaplanabilmesi için Adjoint modelleme yönteminden faydalanılmıştır. RTC-Tools modeli, IPOPT optimizasyon çözücü ve Adjoint modelleme ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 3.4'te açıklanmıştır.

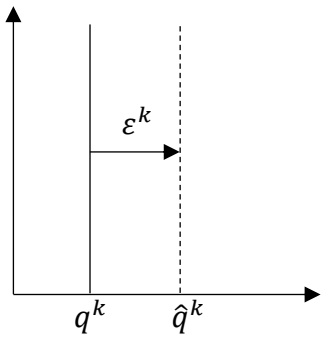
3.2.1. Deterministik akım tahminlerinin (DAT) üretilmesi

Deterministik MÖK; iki farklı akım girdisi ile test edilmiştir. Bunlardan ilki; mükemmel (hatasız) tahmin kabulü ile gözlenen akımların doğrudan kullanılmasıdır. Fakat, baraj giriş akımlarının mükemmel bir şekilde tahmin edilebilmelerinin mümkün olmadığından yola çıkarak, akım tahminlerindeki sapmalar "bağıl akım tahmini hatası" ile ifade edilebilir (Li vd., 2010). Bu bağlamda ikinci olarak ise; gözlenmiş veriden pertürbe edilerek (hata eklenerek) tek üyeli zaman serileri üretilmiş ve Deterministik

Akım Tahminleri (DAT) olarak adlandırılarak (Şekil 3.5) deterministik MÖK'de kullanılmışlardır.

Tahmin verileri üretimi, geliştirilen modelin günlük veya saatlik olması durumuna göre değişir. Kısa dönem işletme çalışmalarında, başlangıç için yeterli olan günlük modeller sonrasında çalışma alanının boyutu (görece küçük hacme sahip olması) nedeniyle yetersiz kalmış ve saatlik kontrol modeline geçilmesi gerekmiştir. Günlük kontrol modellerinde, tüm test periyodu içerisinde DAT verisi sadece bir kez (tek zaman serisi) üretilerek kullanılmıştır. Bu kısım ileride de "Tahmin değerinin test edilmesi" olarak aktarılmıştır (Bölüm 4.3.1.5).

Günlük model testleri; 1-3 gün gibi zaman aralıkları (azalan ufuk) ile 2-4 yıl simülasyon periyodunda çalıştırılmışlardır. Buna kıyasla saatlik çalışmalarda modeller 1-2 saat gibi daha kısa zaman aralıklarında ve 24, 36 ya da 48 saat gibi bir tahmin ufkunda çalıştırılmışlardır. Bu nedenle, saatlik kontrolün günlüğe kıyasla daha veri yoğun olduğu söylenebilir. DAT'ler, günlük modelde tek bir zaman serisi iken, saatlik modelde daha gerçekçi bir temsiliyet için her bir azalan ufukta yeni katsayılarla oluşturulmuştur. Her saat başında kontrol sistemine (ileriye dönük) farklı akım tahmin verileri temin edildiği ve güncelleme yapıldığı bir tahmin sistemi gibi düşünülebilir. Saatlik model testlerinde 5 adet senaryo kullanılmıştır. Bir senaryodan kastedilen aynı gözlem verisi ile aynı hindcast periyodunda rassal olarak üretilmiş birbirinden bağımsız tahmin veri setlerinin test edilmesidir. Tahmin verileri üretimi rassal olduğundan, her üretim birbirinden farklı olmuştur. Bu sayede de sistemin dayanıklılığı ve güvenilirliği de test edilmiştir.



Şekil 3.5 *Tek zaman aralığında DAT üretiminin gösterimi (k anında;* q^k: gözlem, $\hat{q}^k$: tahmin, ε^k: hata)

DAT, bağıl akım tahmini hatası (ε^k) kullanılarak rassal pertürbasyon ile oluşturulmuştur:

$$\varepsilon^k = \frac{\hat{q}^k - q^k}{q^k} \tag{3.12}$$

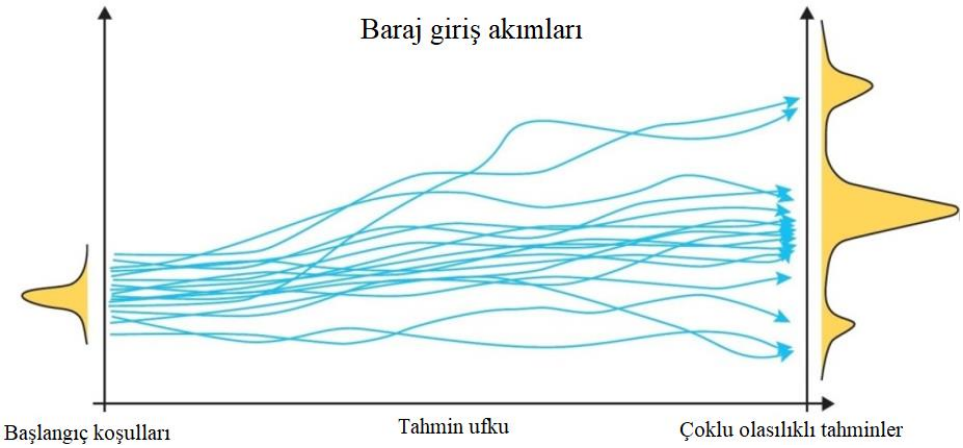
$$DAT: \hat{q}^k = q^k(1 + \varepsilon^k) \tag{3.13}$$

Burada; $k = 1, \dots, N$ zaman aralıkları için sonlu zaman ufku boyunca ε, $\hat{q}$, q sırasıyla bağıl akım tahmini hatası, tahmini akım ve gözlenen akımdır.

Literatürde yapılan farklı hidrolojik modelleme ve tahmin uygulamalarında (gözlenen ve tahmin edilen akım arasındaki) model performansları % 20 – 40 hata aralığındadır (Hui, 2002; Li vd., 2010; Yan, Guo ve Chen, 2014). Bu durumu temsil etmek için, bu çalışmada da sentetik DAT verileri için gözlenen akım ile aradaki farkın ± % 30 olmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, ε değerleri uniform olasılık dağılım rassal (- 0.3) – (+ 0.3) katsayılardan seçilerek DAT verileri hazırlanmıştır.

3.3. Tahmin Belirsizliğinin Gözetilerek Stokastik Model Önsezili Kontrolü

Kısa dönem hidrolojik çalışmalardaki tahmin belirsizliği genelde Olasılıklı Akım Tahminleri (OAT) kullanılarak ifade edilirler. Başka bir deyişle; olasılıklı tahmin sisteminde deterministik tahmin sistemine ek olarak tahmin sonuçlarına belirli bir miktar belirsizlik (uncertainty) ve olasılık (probability) durumu girmektedir (Şekil 3.6). Çoklu model uygulamalarının yanı sıra OAT ya da diğer adı ile ensemble tahminleri üretmenin en bilindik yolu Ensemble Tahmin Sistemi-ETS (Ensemble Prediction Systems) adı verilen sayısal hava tahmin çıktılarının hidrolojik modele girdi yapılmalarıdır (Cloke ve Pappenberger, 2009). ETS için, çalıştırılan atmosferik bilgisayar modelinde atmosfer hareketliliğinin simülasyonunu oluşturulur ve bu esnada kullanılan matematiksel fonksiyonlara küçük sapmalar eklenerek elde edilen çoklu sayıda (30, 50, 100 adet gibi.) üye fonksiyon ve 1 adet kontrol fonksiyondan oluşan hava durumu senaryoları elde edilir. Aslında 1 adet kontrol fonksiyonu bir tek değerli hava tahminidir ve ona belirsizlik katılarak çoklu ve eşit olasılıklı üye fonksiyonu elde edilir. Tahmin süresi uzadıkça farklı hava durumu senaryolarının daha fazla saçıldığı görülmektedir. Bu saçılmaların artması da ilerleyen günlerdeki hava tahminlerinin güvenilirliğinin ilk günlerdeki hava tahminlerine göre daha az olduğunu göstermektedir.

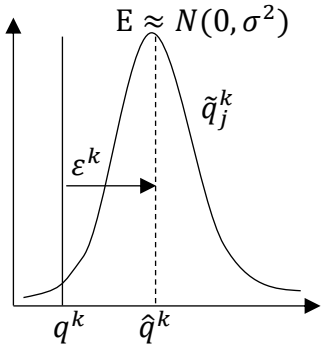


Şekil 3.6. *Olasılıklı tahminlerin tahmin ufkunda davranışı (https://www.ecmwf.int/*)

Tekil deterministik ya da çoklu olasılıklı akım tahminleri kısa dönemli optimizasyon çalışmalarının bel kemiğini oluşturmaktadır. Rezervuar modellemesini ve güncel optimizasyon tekniklerini de içeren bu gibi bir karar destek sistemi çalışmasında rezervuara girdi sağlayan akımın tahmin edilebilmesi çalışmanın değerini ve özgünlüğünü arttırmaktadır. Öte yandan; yağış-akış ilişkileri her havza için farklıdır, havzaya ait yakış-akış parametrelerinin her bir yağış olayı için çıkarılması, gözlenen yağışın akışa geçişinin modellenmesi, model kalibrasyonları ve doğrulama işlemlerini de içeren bir bütündür. Bu ihtiyaç duyulan hidrolojik modelleme ayrı bir uzmanlık alanıdır ve uzun bir ön işlem gerektirmektedir. Bu sebeple, bu araştırma çalışmasında tahmini akımları temsil etmek için çeşitli istatistiksel metotlarla üretilen sentetik tahmin verileri kullanılmıştır. Bölüm 3.3.1'de bu verilerin üretimi için geliştirilen yöntemler sunulmuştur.

3.3.1. Olasılıklı akım tahmin (OAT) üretilmesi

OAT verileri sadece saatlik modelleme kısmında üretilmiştir. DAT verileri tekil değerli tahminleri temsil ederken Olasılıklı Akım Tahminler (OAT), DAT etrafında saçılı ve belirli bir olasılık dağılımına sahip üyeleri olan tahminleri ifade etmektedir (Şekil 3.7). OAT verileri oluşturulurken mevcut ETS verilerinin davranış biçimleri temsil edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.7 *Tek zaman aralığında tahmin belirsizliğinin OAT ile şematize edilmesi*

Tahmin belirsizliğini gözeten (stokastik) optimizasyon modelinde çoklu akım tahminlerini temsil etmek üzere kullanılan OAT (ensemble) verileri oluşturulan DAT verisinin etrafında saçılacak şekilde üretilmiştir. Çalışmada adı geçen belirsizlik; bağımsız ve sıfır ortalamaya sahip Gauss dağılımından seçilen "bağıl standart hata" *(relative standard error)* ile ifade edilmektedir. Bu sebeple, olasılık dağılım fonksiyonu olarak her zaman aralığında $\varepsilon \approx N(0, \sigma^2)$ kabul edilmiştir (Datta ve Burges, 1984; Zhao vd., 2011a; Zhao vd., 2013; Pianosi ve Raso, 2012).

Meteorolojik çalışmalarda üretilen olasılıklı hava tahmin verilerinde başlangıç anı için düşük olan belirsizlik (daha tutarlı bilgi sayesinde) zamanda ilerledikçe (kaotik ortam ile) artmaktadır. Gerçek durumu benzer şekilde temsil etmek için her bir zaman aralığında ve seçilmiş bir tahmin ufku için belirsizliğin arttığı bir "Tahmin Evrilme Süreci (TES)" geliştirilmiştir. Öte yandan, bu çalışmada Zhao vd. (2011) yaklaşımı gözetilerek, artan belirsizlik koşuluna rağmen her bir tahmin üyesinin zaman serisi içinde önceki değerle belirli bir korelasyonda olması koşulu dikkate alınmıştır. Aksi durumda çoklu tahmin verilerinin belirsizlikleri ifade etme biçimleri düzensiz olacak ve stokastik optimizasyona katkı sağlamayacaktır. Farklı olarak ise bu çalışmada, ardışık zamandaki değerler arası ilişkiler aşağıda önerilen algoritma ile ifade edilmiştir. Genel olarak açıklamak gerekirse, sentetik OAT'ler pertürbe edilmiş DAT'ye bağlı amprik koşullu dağılımdan oluşturulmuştur. Diğer bir ifade ile DAT'ye bağlı belirli bir ortalamaya (μ) ve belirsizlik seviyesini ifade eden bağıl standart hataya $(\hat{\sigma} = \sigma * \mu)$ sahiptirler.

Olasılıklı bir tahmin senaryosu aşağıdaki şekilde bir OAT matrisi ile ifade edilirse:

$$OAT = \begin{bmatrix} \tilde{q}_1^1 & \tilde{q}_2^1 & \dots & \tilde{q}_j^1 & \dots & \tilde{q}_M^1 \\ \tilde{q}_1^2 & \tilde{q}_2^2 & \dots & \tilde{q}_j^2 & \dots & \tilde{q}_M^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{q}_1^k & \tilde{q}_2^k & \dots & \tilde{q}_j^k & \dots & \tilde{q}_M^k \\ \tilde{q}_1^N & \tilde{q}_2^N & \dots & \tilde{q}_j^N & \dots & \tilde{q}_M^N \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Burada $k = 1, \dots, N$ için N tahmin verisi uzunluğunu (diğer bir ifade ile tahmin ufkunu), M ensemble üye sayısını, $j = 1,2, \dots, M$ ve $\tilde{q}_j^k$ OAT matrisinden seçilmiş rastgele bir ensemble üyeyi ifade etmektedir.

Çalışma tarafından önerilen TES, iki temel adımdan oluşmaktadır:

i. Başlangıç zaman adımında ilk üyeler, yani OAT $\left(\tilde{q}_j^1\right)$ elemanları, o anki DAT değerini ortalama kabul eden, (başlangıç zamanı olduğu ve gözlem anına çok yakın olduğundan) düşük hata içeren ($\hat{\sigma}^k = 0.001$) ve normal dağılıma sahip rassal değişkenlerle oluşturulurlar:

$$\tilde{q}_j^k = N{\sim}(\hat{q}^k, \hat{q}^k * \hat{\sigma}^k) \quad k = 1 \;\&\; j = 1,2, \dots, M \quad (3.15)$$

ii. İkinci ve tahmin ufku N'e kadar devam eden sonraki adımlarda ise yeni üretilen üyeler bir önceki tahmin üyeler ile ilişkilendirilerek üretilmiştir. Bu amaçla, ardışık zamanlardaki DAT verilerinin farkları hesaplanarak, bir önceki zamana ait DAT verisinin etrafında saçılmış hatalara eklenmiştir (Denklem 3.16). Denklemde negatif verilerin oluşmasını engellemek için maksimum değer fonksiyonu eklenmiştir.

$$\tilde{q}_j^k = (\hat{q}^k - \hat{q}^{k-1}) + \max(N{\sim}(\hat{q}^{k-1}, \hat{q}^{k-1} * \hat{\sigma}^k), 0) \quad (3.16)$$

$$k = 2, \dots, N \quad \& \quad j = 1,2, \dots, M$$

TES'e ait diğer özellikler ise şunlardır:

Daha uzun tahmin ufkunun güvenilirliğinin düşük olacağı düşüncesiyle, seçilen tahmin anı için tahmin belirsizliği (bağıl standart hata açısından) her üye için aynı fakat tahmin ufku süresinde artan şekilde tanımlanmıştır.

$$\hat{\sigma}^{k-1} \leq \hat{\sigma}^k \leq \hat{\sigma}^{k+1} \quad (3.17)$$

Öte yandan, tahmin belirsizliği yağışların arttığı dönemde artan bir yapıya sahiptir. OAT hidrografları yağışın olmadığı (ya da hidrografın düşüşe geçtiği) zamanlarda daha az belirsizliğe sahip olduğundan, saçılım azalarak OAT üyeleri birbirlerine daha çok

yaklaşırlar. Bu fiziksel durum gözetilerek gerçeğe daha yakın bir simülasyon yapmak adına, bağıl standart hata değerleri giriş akımlarının durumlarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenmiştir:

$$\hat{\sigma}^k = \begin{Bmatrix} \hat{\sigma}^k = \hat{\sigma}^{k-1} & eğer & \hat{q}^k \leq \hat{q}^{k-1} \\ \hat{\sigma}^k > \hat{\sigma}^{k-1} & eğer & \hat{q}^k > \hat{q}^{k-1} \end{Bmatrix} \tag{3.18}$$

Yukarıda bahsedilen farklı koşullardan ötürü uygulama esnasında farklı başlangıç zamanlarında belirsizliği aynı katsayılar ile ifade etmek kolay değildir. Bu sebeple, üyeler oluşturulmadan önce maksimum bir tahmin belirsizliği hedeflenmiş (nihai zaman adımındaki bağıl standart hata, $\hat{\sigma}^N$) ve her zaman aralığı için marjinal (artımlı) hata değerleri hesaplanmıştır. Örneğin, tahmin ufku $N = 48$ saat olan bir OAT için $\hat{\sigma}^N = 0.1$ seçildiğinde ortalama $\hat{\sigma}^k = \frac{0.1}{48} = 0.002$ olmaktadır. Bu değer, Denklem 3.17'yi sağlamak için her adımda kendi kadar arttırılırken Denklem 3.18'e göre de akım durumu dikkate alınarak bir önceki değer ile aynı tutulabilir.

3.3.2. Çoklu-aşama stokastik model önsezili kontrolü

Stokastik optimizasyon; akımlar, buharlaşma oranları, hidrolojik parametreler, sistem ihtiyaçları ve ekonomik parametreler ile ilgili belirsizliklerin de dahil edildiği bir optimizasyon yöntemidir (Labadie, 2004). Model parametreleri kesin olmayan ve çeşitli olasılık yoğunluk fonksiyonlarına sahip rassal parametrelerden seçilirler. Bu gibi istatistiksel kabüller ile gerçekleştirilen stokastik optimizasyon teknikleri, OAT'lerin dahil olduğu kısa dönem ve gerçek zamanlı işletme gerektiren bir kontrol sisteminde kullanılmak üzere uygun değillerdir. Kısa dönemli gerçek zamanlı bir işletme kontrolünde, OAT'ler tahminlerdeki belirsizliği değerlendirmek için uygun verilerdir. Artan belirsizlik eşit olasılıklı saçılımlı baraj girdisi olarak işletmecilere gelecekteki olası durumları sunar. Fakat bu veriler her zaman aralığı için ileriye dönük çoklu onlarca ya da yüzlerce senaryo üye içerdiğinden, bunların optimizasyon modelinde doğrudan kullanılabilmeleri çoklu-boyut problemi yaratmaktadır ve matematiksel zorluklar içermektedir. En basit yaklaşımda, gruptaki her bir OAT için deterministik bir optimizasyon yapılarak çoklu ve birbirinden bağımsız (independent) çoklu optimum sonuçlar elde edilebilinir. Bu sonuçlar daha sonra tek bir grafikte üstüste çizdirilerek kontrol kararları yorumlanabilir. Bu durumda, uygulama teknik açıdan kolay fakat tek bir işletme sonucu yerine bir grup işletme seti mevcut olduğundan uygulama açısından

zordur. En iyi optimizasyon modelinin kabulü durumunda bile uygulayıcı onlarca (30, 50, 100 vb.) farklı işletme seçeneği ile karşı karşıya kalır ve hangisinin seçileceği bilinmediğinden başka bir belirsizlik oluşur. Bir diğer uygulanan yöntem ise çoklu verileri yakınlıklarına göre farklı gruplara (% 25, % 50, % 75 gibi) ayırarak kontrol senaryoları oluşturmaktır. Bu çoklu set işletim stratejilerinden eksik ya da yanlış bir karar ile yanlış işletme stratejisi ile sonuçlanabilir. Bu yaklaşım stokastik bir optimizasyon modeli ya da tam olarak belirsizliği gözeten bir uygulama olmayabilir.

Diğer bir yöntem ise, MÖK'yi OAT verisini kullanarak stokastik optimizasyon problemine dönüştürmektir. Bunun için deterministik modeldeki d^k akım girdisi yerine stokastik yapıyı temsil etmek için MÖK'de j ensemble indeksi ($j = 1, \dots, M$) ve k zaman aralığını ($k = 1, \dots, N$) ifade edecek şekilde çoklu olasılıklı (ensemble) d_j^k OAT üyeler kullanılır. Aynı zamanda, durum değişkenleri, bağımlı değişkenler ve kontrol değişkenleri de çoklu şekilde tanımlanmaktadır. Bunun için daha önce Denklem (3.9)'da gösterilmiş tekil girdili deterministik amaç fonksiyonu çoklu üyeleri içerecek şekilde J ve E terimleri yeniden düzenlenerek olasılık-ağırlıklı amaç fonksiyonununa çevrilmiştir:

$$\underset{u, x \ \in \{0, \dots, T\}}{min} \sum_{j=1}^{M} p_j \sum_{k=1}^{N} J(x_j^k, y_j^k, u_j^k, d_j^k) + E\left(x_j^N, y_j^N, u_j^N, d_j^N\right) \qquad (3.19)$$

Burada, M ensemble üye sayısını ifade edecek şekilde p_j ağırlıkları için her bir ensemble üyeye ait olasılıktan faydalanılabilir.

Kullanılabilir depo hacminin kısıtlı olmasından ötürü problemin çözümü kontrol değişkeninin $\left(u_j^k\right)$ tanımlanma şekline bağlıdır. Optimizasyon problemini çözülebilir kılmak için farklı yaklaşımlar uygulanabilir. Örneğin, tüm üyeler için optimal olacak (ortalama üzerine, en kötü durum senaryosu ya da rastlantısal kısıtlı programlama gibi..) ileriye ait kontrol yörüngesi bulunabilir. Bunlar arasında ortalama üzerine çözüm (ya da diğer bir ifade ile Multiple Model Predictive Control, MMPC) yaklaşımında (van Overloop vd., 2008) çözüm sonucu kontrol değişkeninin tek bir ortak değişkene $(u_j^k = u^k)$ eşit olduğu kabul edilerek optimizasyon yapılabilir. Bu durumda, yöntem çoklu girdili hale getirilir. Bu yaklaşım, OAT'lerin çok farklılık göstermediği; diğer bir ifade ile çok saçılmadığı durumlarda fizibil (olurlu) çözümler (*feasible solution*) verebilir. Fakat, rezervuar sistemi çok fazla kısıt içeriyorsa problemin boyutundan dolayı çözülmesi mümkün olmayan durumlar ortaya çıkabilir. OAT üye sayısı arttıkça uygulama ve çözüm zorluğu da artmaktadır. Ayrıca, çoklu tahminlerdeki belirsizliğin zaman içerisindeki

değişimi kontrol değişkenlerine yansıtılmadığından, bu yöntemin tam olarak tahmin belirsizliğini gözettiği söylenemez.

Bu yaklaşımlara alternatif ise çoklu-aşama stokastik optimizasyon (multi-stage stochastic optimization) ile akım girdilerinin yanı sıra durum ve kontrol değişkenlerinin de optimizasyonda çoklu olarak dahil edilmesidir. Ancak, durum ve kontrol değişkenlerinin çokluğundan ötürü yaklaşım yine boyut problemi içermektedir. Bu hali ile pratik olmaktan ziyade kavramsal boyutta kaldığı düşünülmektedir (Mayne vd., 2000). Bu sorunu aşmak için girdilerin çeşitli senaryolarla azaltılmaları önerilmiştir (Watkins vd., 2000; Dupačová, Gröwe-Kuska ve Römisch, 2003; Heitsch ve Römisch, 2003; Raso vd, 2014). Bu çalışmada da çoklu-aşama stokastik optimizasyon yaklaşımı altında Ağaç-Tabanlı Model Önsezili Kontrolü (AT-MÖK) (Raso vd., 2013, Schwanenberg vd., 2015) uygulanmıştır. Akım girdilerinin yanı sıra durum ve kontrol değişkenleri de senaryo ağaçları ile azaltılarak problem boyutu çözülebilir hale getirilmiştir. Çoklu-aşama stokastik optimizasyon, ağaç dalları için de farklı optimal stratejiler bulmaktadır. Böylelikle tahmin belirsizliğinin kontrol sistemine adapte edilmesini sağlayarak belirsizliğe bağlı hassaslığı azaltarak işletme performansını arttıracağı düşünülmektedir (Raso vd., 2014) Doğru ağaçlandırma yönteminin seçilmesi ise optimizasyonun performansını doğrudan etkiler. Bir sonraki kısımda araştırma çalışmasında kullanılan azaltma yöntemi hakkında detaylı bilgi sunulmuştur.

3.3.3. Çoklu-olasılıklı girdilerin azaltma yöntemleri

OAT'de ensemble üye indeksi $j \epsilon \{1, \dots, M\}$ ve zaman indeksi $k \epsilon \{1, \dots, N\}$ olan bir ensemble yörüngesi (OAT üyesi) $\{\xi_j^k\}$ tanımlandığında her üye $\sum_{n=1}^{N} p(\xi_j) = 1$ olmak üzere $p(\xi_j)$ olasılığa sahiptir. Öte yandan üretilme yapıları itibarıyla da OAT tahminler her zaman anında eşit olasılıklıdır.

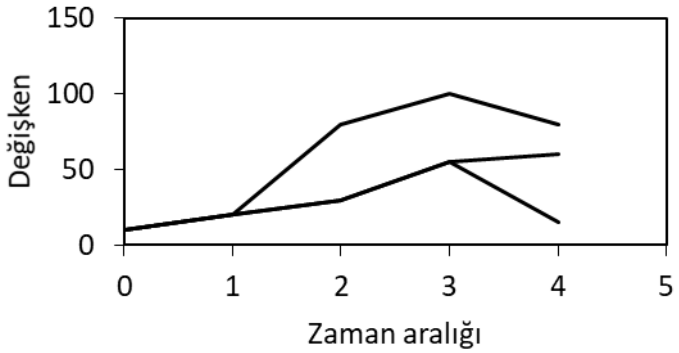
$$p(\xi_j) = \frac{1}{N}, \forall \xi_j, j \epsilon \{1, \dots, M\} \tag{3.20}$$

Gelecek için beklenen olasılıkları saçılımlı şekilde ve her zaman anı için çoklu üyeler ile temsil eden ensemble gruba kıyasla, senaryo ağacı (*scenario tree*) yörüngelerin (akım girdisi, durum değişkeni ya da kontrol değişkeni olabilir) dallanma noktalarını içerir. Senaryo ağacı yapısı ise köklü ağaç (*rooted tree*) yapısı olarak ifade edilmektedir. Bu demektir ki ağaç yapısı $k = 1$ zaman anında tek bir ortak üye (kök ağaç) bulunmaktadır. Başlangıç zaman anında tüm yörüngeler eşit olasılığa sahiptir.

Sonrasında, ağaç dalları şeklinde saçılmalar olur. Burada tahmin ufku sonunda beklenen toplam ağaç sayısı kullanıcı tarafından belirlenir. Örneğin; 50 üyeli bir OAT son zaman anında ($k = N$) 2, 4, 8 vb 2^xadet azaltılmış üye olacak şekilde seçilerek benzer üyelerin ortak dallar ile temsil edildiği bir forma dönüştürülür. Hangi sayıda ağaç seçileceğine dair kesin bir yöntem bulunmamakla birlikte uygulama kısmında bu karar deneme-yanılma yöntemleriyle belirlenmiştir.

Ağaç tabanlı bir akım girdisi ξ_j bir ensemble üye olmak üzere dallardan ağaç köküne doğru ilk karşılaşılan ensemble ξ_i üye ($j \neq i$ iken), bu üye ξ_j ensemble üyenin atası (*parent*) olarak adlandırılır. ξ_i'nin ξ_j'nin ($j \neq i$) atası olduğu zamana ξ_j ensemble üyenin dallanma noktası (*branching point*) denir. Her dallanma noktasında, olası ensemble üyelerin örnek uzayı en az iki alt kümeye ayrılır. Örnek bir ağaç tabanlı azaltma senaryosu için ağaç yapısını ifade eden senaryo ağaç düğüm ayırma A matrisi, Denklem (3.21)'de, ve değişken gösterimi Şekil 3.8'de sunulmuştur.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 3 & 6 & 6 \\ 4 & 7 & 7 \\ 5 & 8 & 9 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$



Şekil 3.8 *Ağaç tabanlı azaltım örneği*

Burada son zaman anı hedef üye sayısı 3'tür. k= 1 anına kadar üyeler arası saçılma olmadığından tek bir dal ile ifade edilmektedir ve olasılık 1'e eşittir. Sonrasında, ata üye k=2'de bir dallanma noktası oluşturmuş ve iki alt kümeye ayrılmıştır.

OAT'lerin azaltılması için yakın zamanda Fan vd. (2016) tarafından geliştirilen kütle korunumlu senaryo ağaç azaltma (mass conservative scenario tree reduction)

yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem test edilerek daha iyi performansta çözüm sunduğu görülmüştür. Yöntemin yenilikçi özellikleri şu şekilde ön plana çıkmaktadır (Schwanenberg vd. 2015; Fan vd. 2016):

1. Azaltma süreci boyunca olasılık ağırlıklı miktarları sabit tutulur.
2. Azaltma işleminde ağaç içerisinde sabit sayıda dal çıkarılır.
3. Orijinal OAT özelliklerini olabildiğince temsil edilmektedir.

3.4. Gerçek Zamanlı Kontrol Uygulama Yöntemi

GBK ve MÖK baraj işletmesi çalışmaları farklı zaman serileri, çoklu girdiler, farklı modellerin birbiri ile entegre çalıştırılması ve özellikle MÖK model kurgularında ardışık modelleme uygulamalarını gerektirmektir. Gerçek zamanlı bir hidrolojik tahmin ve/veya işletme çalışması, birbiri ile entegre veri işleme ve bilgisayar modelleri bütününü içerir. Örnek olarak, farklı tahmin verileri ile beslenen bir model sistemi oluşturmak, bu tahmin verilerini hidrolojik modellere girdi sağlamak, hidrolojik modeli data asimilasyonları ile bütünleştirmek, sonrasında ise bunları bir işletme modelinde çalıştırmak gerekebilir. Bunun yanı sıra, bu araştırma çalışmasında olduğu gibi kurgulanan işletme çalışmasında geçmiş döneme yönelik gerçek zamanlı bir benzetim kurgulamak için ardışık optimizasyon ve simülasyon teknikleri uygulamak, başlangıç koşullarını güncellenen sistemden almak ve tahmin edilen kontrol değişkenini gerçekleşen akımlar ile güncellemek gerekebilir. Her bir adımın ayrı ayrı ve sürekli yapılması kısa dönem bir karar destek sisteminde oldukça zorlayıcıdır. Bu durumda önceden tasarlanmış gelişmiş platformlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla çalışmada, Deltares tarfından geliştirilen Delft-Flood Early Warning Systems (FEWS, http://oss.deltares.nl/web/delft-fews/) açık veri işleme platformu kullanılmıştır. Gerçek zamanlı su kaynakları kontrolü (simülasyon ve optimizasyon) için ise Delft-FEWS platformuna entegre edilebilen RTC-Tools (Real Time Controls, https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/) modeli kullanılmıştır. Bu kısımda FEWS ve RTC-Tools model yapıları kısaca sunulmuştur.

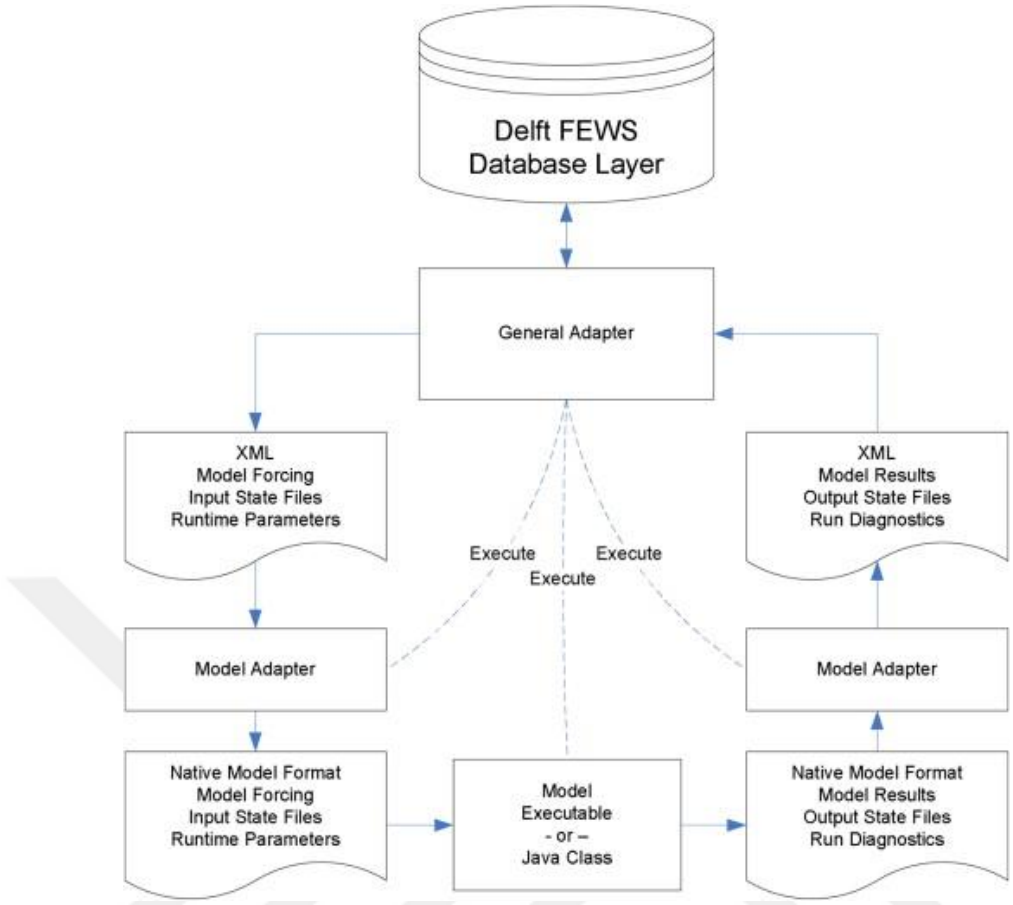
3.4.1. Flood Early Warning System (FEWS)

Çoklu veri, proses ve dönüşüm algoritmlarının olduğu çalışmaların uygun platformlarda bütünleştirilmesi gerçek zamanlı işletme açısından uygulanabilir karar destek sistemleri sunmaktadır. Deltares tarafından geliştirilen Delft-FEWS (Taşkın Erken Uyarı Sistemi) çeşitli tahmin merkezleri tarafından dünyada birçok bölgede farklı çalışma

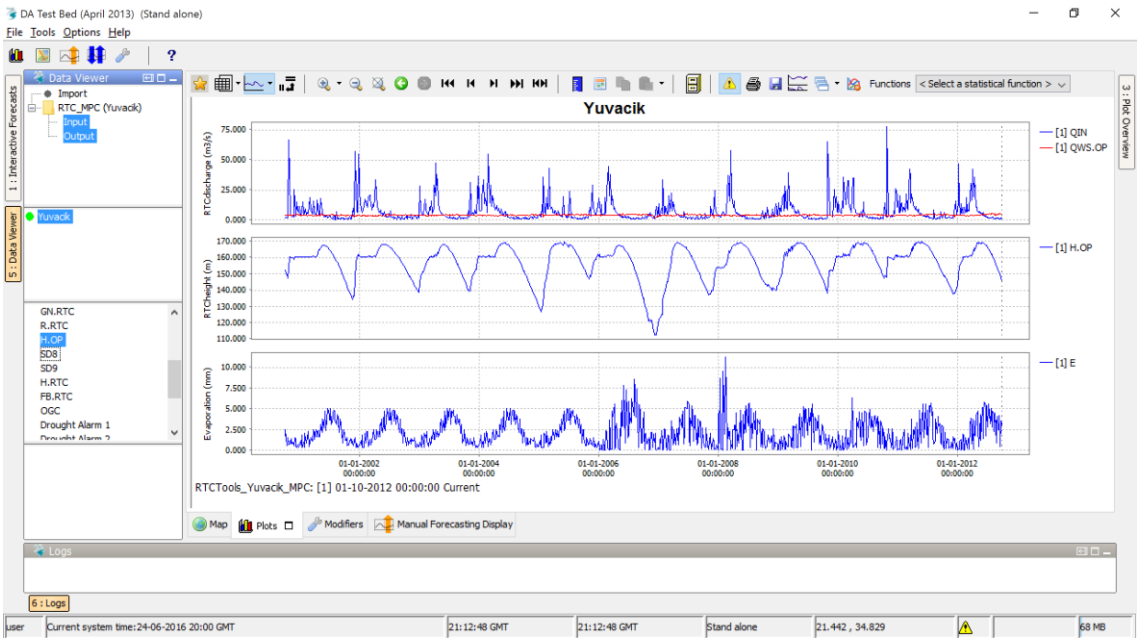
ve araştırma örneklerinde kullanılmaktadır (Werner vd., 2013). FEWS, özellikle taşkın tahmini, kuraklık ve mevsimsel tahmin, su kaynaklarının gerçek zamanlı işletilmeleri gibi amaçlarda uzman bir veri işleme ve model entegrasyonu sağlayan bilgisayar yazılımıdır. Bu yazılım, ücretsiz olarak indirilebilir eXtensible Markup Language (XML) tabanlı bir yapıdadır. Çeşitli XML formatta dosyalar bütünü içinde model parameterleri, veri ilişkileri, görüntü seçenekleri ve entegre sistemlerin kullanıcı tarafından konfigürasyonun yapılmasına imkan verir. Bu hali ile hazır bir paket programdan farklı olarak ihtiyaca uygun ve gelişime açık XML tabanlı şematizasyonlar içerir ve esnek şekilde amaca uygun olarak kodlanabilir.

Aşağıda Şekil 3.9'da XML ile veri akışı ve düz çizgilerle gösterilen önceden hazırlanmış özgün modellerle kesikli çizgilerle gösterilen değiştirilebilir kodlama arasındaki bağlantı sunulmuştur. (Werner vd., 2013). Burada, en temel model konfigürasyonu olan "General Adapter" ile girdi, modeller, çıktılar ve durum değişkenleri ilişkileri gösterilmiştir. Geliştirilen rezervuar modeli ve veri bütünü Delft-FEWS içerisinde kurgulanarak karar destek sistemine dönüştürülmüştür. Bunun için ise model parametreleri, girdi modülleri, RTC-Tools model veri setleri, başlangıç koşulları, iş-akış ilişkileri (workflows), arayüz filtreleri ve model konfigürasyonları oluşturulmuştur.

Bu amaçla, öncelikli olarak çalışmanın ilk kısmında XML tabanlı bir ağ kurularak, FEWS'de bir veri girdi modülü oluşturulmuştur. Veri girdi modulü, sonradan oluşturulan RTC-Tools modeline girdi sağlayarak, Workflow modelleri ile optimizasyon modeli arasında bir link kurulmuştur. Şekil 3.10'da yazılan modulün çalıştırılması sonucunda XML tabanlı verilerin girdi yapıldığı FEWS ekran görüntüsü sunulmuştur. İşletme çalışmalarına ait çıktılar modellerin uygulama bölümlerinde (Bölüm 4 ve 5'te) sunulmuştur.



Şekil 3.9 *FEWS database tabanı ve modellerle ilişkisi (Werner vd., 2013)*

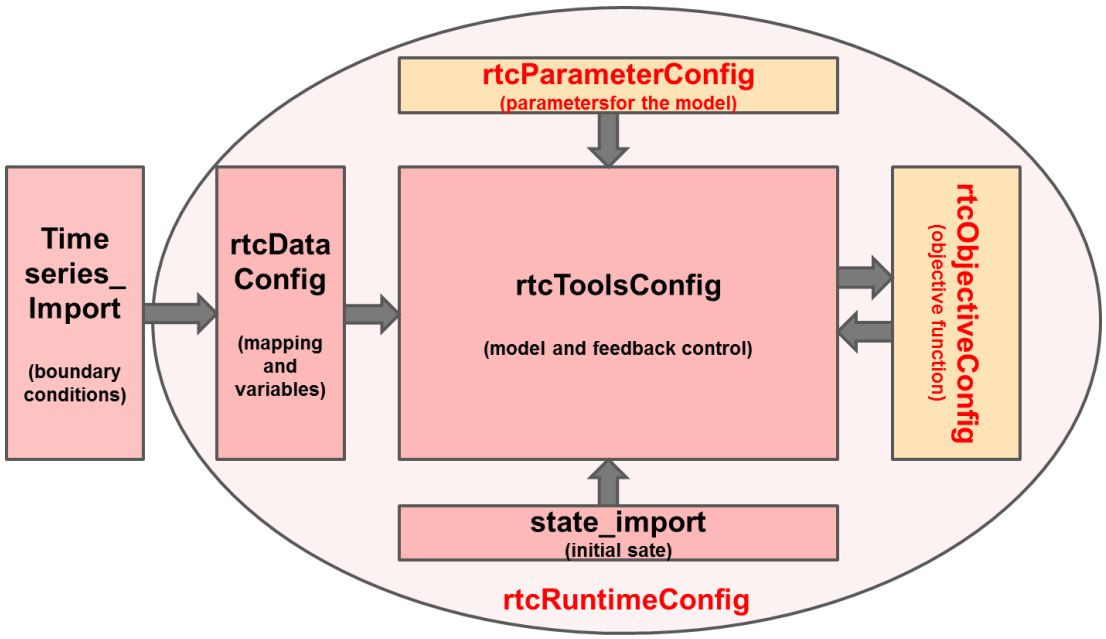


Şekil 3.10 *Uygulama alanından girdi gösterimi: (a) Toplam baraj giriş akımları (QIN) ve içme & kullanma suyu akım grafikleri (QWS.OP); (b) Baraj seviye değişimi (H.OP); (c) Buharlaşma verisi (E)*

3.4.2. Real-Time Control (RTC) tools

RTC-Tools (Real-Time Control Tools, Gerçek Zamanlı Kontrol Aracı) yazılımı öncelikli olarak GBK ile rezervur simülasyonları yapmak amacıyla 2007 yılında "Delft-FEWS Rezervuar Modülü" olarak olarak geliştirilmiştir. Güncel hali ile model paketi, birden çok farklı yapıda elemanı içerecek şekilde su kaynakları sistemlerinin gerçek zamanlı simülasyonların yapılmasına olanak sağlar. Bu hali ile işletme kuralları, trigerler vb. içeren GBK yanı sıra tahmin ve optimizasyon ile bütünleştirilmiş MÖK kurgulamaya imkan tanır.

MÖK tabanlı stratejiler, optimizasyon aşamasında kontrol edilen su sistemlerinin farklı elemanlarının ilişkilerine (dolayısıyla içsel modellerine) ihtiyaç duymaktadır. Bu açıdan, su kaynağı modeli oluşturmaya yönelik basit birçok hidrolojik ve hidrolik model elemanı model içerisinde tanımlı haldedir. Model uygulaması, optimizasyon işlemini gerçekleştirmek ve birinci dereceden model türevlerinin hesaplanması için hem bir simülasyon modu hem de bir adjoint modu içermektedir. Adjoint modelleme ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki alt başlıkta verilmiştir. Rezervuar sistem modeli (tasarımı) birbiri ile entegre, önceden tanımlanmış ve konfigüre edilebilir XML dosyasının bir model (bin dosyası) altında çalıştırılması ile oluşturulur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 *RTC-Tools çalışma hiyerarşi şeması (Schwanenberg ve Becker, 2009)*

RTC-Tools'da kullanılan XML tabanlı konfigürasyon dosyaları şu şekildedir:

rtcToolsConfig.xml – simülasyon modelinin şematizasyonunu içerir. Bu dosya, rezervuar fiziksel eğrileri (hacim-satıh eğrisi, çıkış yapıları eğrileri vb.) ile model fiziksel yapıları arası parametrelerin (dolusavak deşarjı, su temini deşarjı, hidroelektrik için türbinlenecek suyun deşarjı gibi) birbirleri ile ilişkilerinin tanımlandığı alandır. Her bir konfigürasyon dosyası model içinde tanımlı şematizasyonlara bağlı olarak çalışır.

state_import.xml – başlangıç koşullarının tanımladığı dosyadır.

timeseries_import.xml – zaman serileri bilgilerinin tanımlandığı dosyadır.

rtcDataConfig.xml – zaman serisi parametrelerin hangi uzantıdan alınıp, hangi uzantıya yazılacağı ya da FEWS'e entegre edilecek OpenMI (esnek bir modül konfigürasyonu) modülü için tanımlarını içerir.

rtcRuntimeConfig.xml – simülasyon zaman aralığı, çalıştırma modülü (simülasyon, optimizasyon) ya da optimizasyon hata tolerası gibi optimizasyon parametrelerinin belirlendiği .xml dosyasıdır.

rtcObjectiveConfig.xml – optimizasyon içerisinde amaç fonksiyonu ve kısıtların ve buna bağlı değişkenlerin tanımlandığı ve parametrelerinin ayarlandığı dosyadır.

3.4.3. IPOPT ile matematiksel optimizasyon

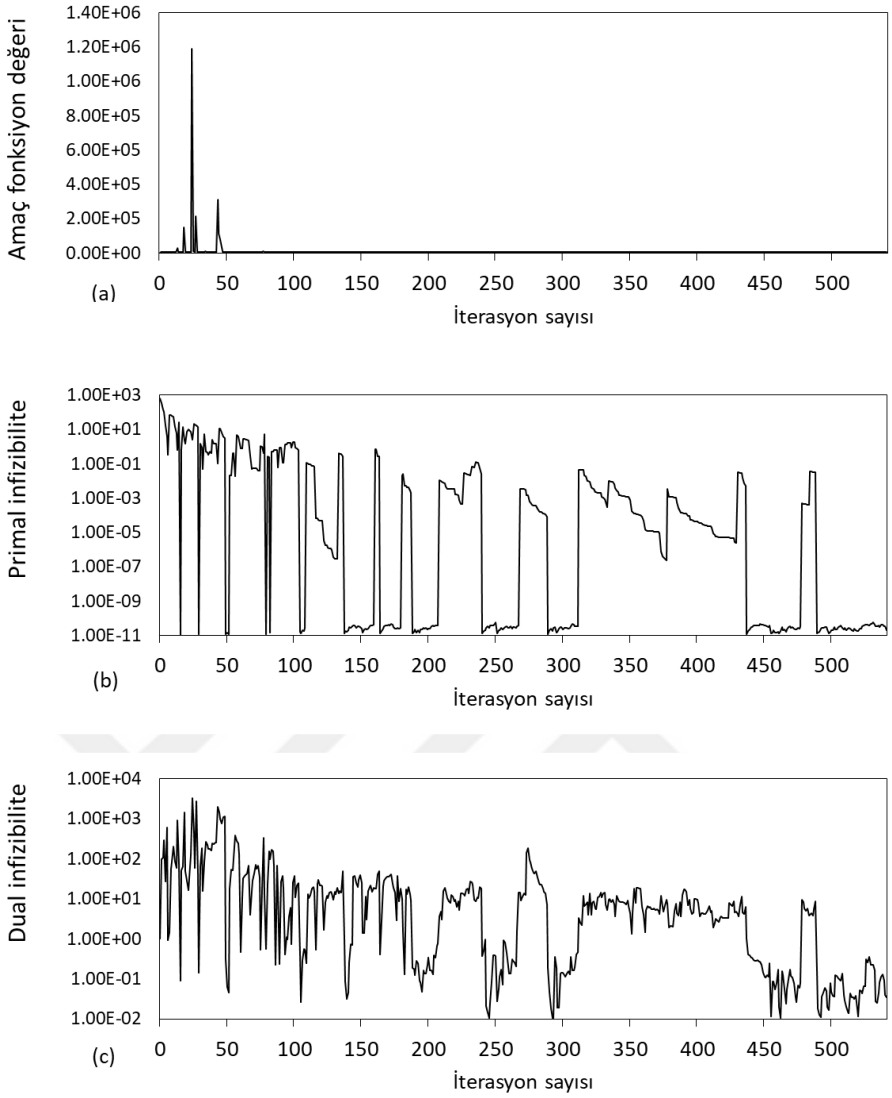
Optimizasyon modeli; girdi ve çıktıların kontrol, durum (bağımsız) ya da bağımlı değişkenlere dönüştürüldüğü ve kullanıcı tarafından belirlenen bir amaç fonksiyonunun minimize/maksimize edildiği bir araştırma sürecidir. Bu açıdan MÖK rezervur işletme uygulamasında her bir zaman adımı, bir önceki durum değişkeni ile o anki kontrol değişkeni arasında bir bağıntıdır. RTC-Tools; GAMS, IPOPT, SA ve SNOPT optimizasyon algoritmaları ile çalıştırılabilmektedir. Çalışmada, konfigüre edilen model optimizasyon denklemleri (yumuşak ve sert kısıtlar) sonrasında iç-nokta problem çözücüsü (Interior Point Optimizer, IPOPT) ile optimize edilmiştir (Wächter ve Biegler 2006). Optimize edilen değişkenler devamlı bir iterasyona sokularak en iyi çözüm veren (performansı en yüksek) değişken değerleri tespit edilir. Bu iterasyonlarda çözüme ulaşmak için doğrusal olmayan optimizasyon hatası (E_{NLP}) kullanılır. E_{NLP} kullanıcı tanımlıdır ve uygulama esnasında deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. İki önemli optimizasyon parametresi (tolereans kriteri ve kabul edilebilir hata) dikkate alınarak optimizasyon parametreleri sürekli değiştirilir. E_{NLP} üç farklı değişkenin bir

fonksiyonudur. Bunlar; amaç fonksiyonu değeri $f_{amaç}$, primal infizibilite (C_{pr}) ve dual infizibilitedir (C_{du}):

$$E_{NLP} = max\left[C_{pr}, C_{du}, f\left(f_{amaç}\right)\right] \tag{3.22}$$

Burada, $f\left(f_{amaç}\right)$ amaç fonksiyonunun bir iterasyondan diğer iterasyona değişim değerini ifade etmektedir. Bu değişimin başlangıç noktasından itibaren azalan ya da artan (problem tanımına bağlı olarak) şekilde olması istenmektedir. Örneğin, bu çalışmada amaç fonksiyonunun minimize edilmesi hedeflenmiş olduğundan azalması beklenmektedir. Hatanın kabul edilebilir olduğu en düşük değerde optimizasyon parametrelerinin optimum olduğu kabul edilir. Öte yandan, optimizasyon kısıtlarının uygunluğu primal infizibilite ile ölçülür. Benzer şekilde primal infizibilitenin de belirlenen eşik değerden küçük olması istenir.

Her (primal) optimizasyon problemi bir dual probleme dönüştürülebilir. Diğer bir ifade ile her primal problemin içsel ilişkili olduğu bir dual (ikiz) problem yazılabilir. Bir minimizasyon problemi aynı değişkenler ile maksimizasyon problemine dönüştürülebilir. Bu ikili yapı dualite (ikililik) olarak adlandırılır. IPOPT yapısı da dual infizibiliteden faydalanarak daha güvenli bir yaklaşım sunar. Bu bağlamda, optimum sonuç aranırken dual infizibilite de kontrol edilerek belirlenen eşik değerinden düşük olması istenir. Optimizasyon iterasyon adımları karşılığında amaç fonksiyonu, primal infizibilite, dual infizibiliteye ait örnek bir gösterim Şekil 3.12'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi, amaç fonksiyonu değeri 50 iterasyondan sonra sıfıra yakınsasa da optimizasyonda primal ve dual infizibilite koşulu sağlanana kadar devam edilir. Ancak tüm koşullar sağlandığında optimum sonuç garanti edilir. Bu iterasyondaki kontrol değişkeni değerleri optimum değerlerdir ve kontrol modeli simülasyonlarına ara model kodları ile taşınarak kullanılır.



Şekil 3.12 *İterasyon adımları karşılığında (a) amaç fonksiyonu, (b) primal infizibilite, (c) dual infizibilite*

3.4.4. Adjoint modelleme

Ardışık Karesel Programlama (Sequential Quadratic Programming) veya IPOPT yöntemleri gradyan tabanlı çözücülerde verimli bir çözüm performansı (örneğin daha hızlı yakınsama) elde etmek için amaç fonksiyonu gradyanına (dJ(x, u)/du) ve kısıtların Jacobi matrisine (dh(x, u)/du) ihtiyaç duyarlar. Bu birinci derece türevler, sayısal türevleme (*numerical integration*) yöntemi ile kolay bir şekilde hesaplanabilir; ancak n sayıda kontrol değişkeni ve z sayıda sıfır olmayan jacobi kısıtı içeren optimizasyon problemi için en az (n + z + 1) kez model yürütme (*model execution*) gerektirir. Bu şekilde hesaplama için (yüzlerce veya binlerce boyuta sahip problemlerin çözümünde) hesaplama

zamanı (*computation time*) oldukça uzundur; ve bu durum kısa dönem işletme uygulamada verimsizlik sorunu yaratır.

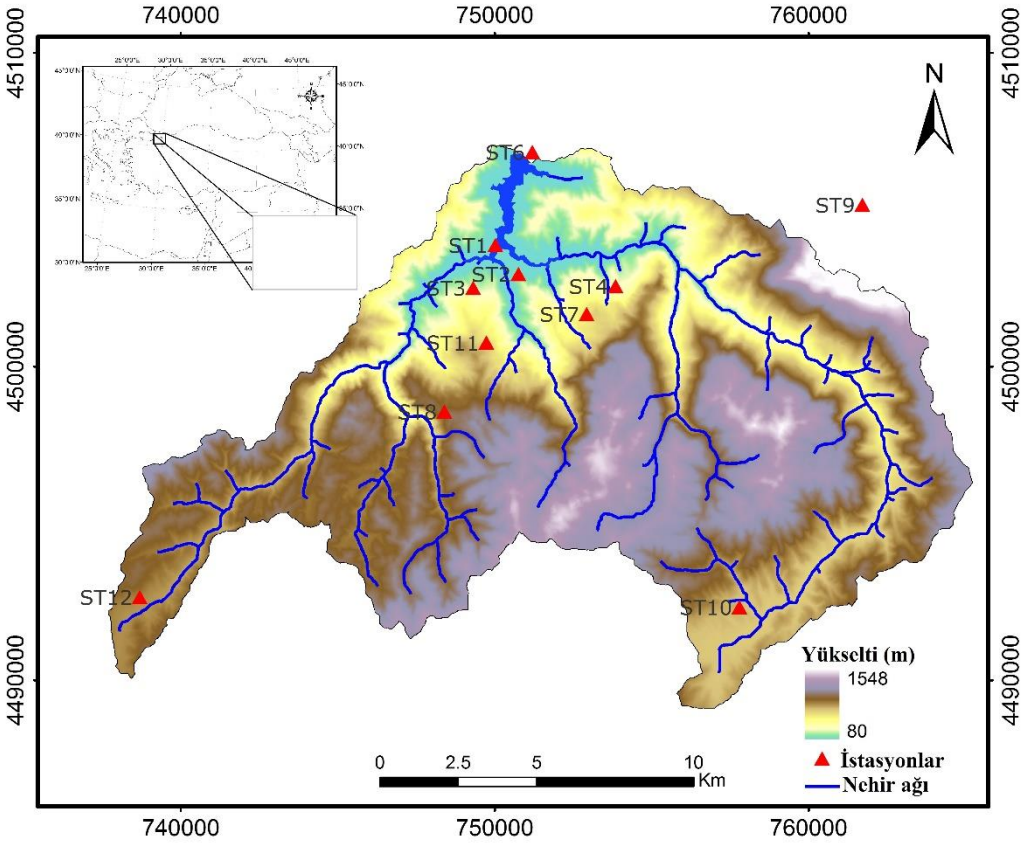
Buna alternatif bir metot ise, tek bir model yürütmede daha verimli hesap yapmak için, her modelleme bileşeni için bir adjoint modelin kurulmasıdır. Bu açıdan RTC-Tools yapısı bu modellerin hem simulasyon modunda hem de geriye dönük adjoint modunda (reverse mode) entegre edilmesine olanak sağlar. Bir adjoint modelinin türevleri ise otomatik diferansiyelleme yöntemi (automatic differantion, AD) ile bulunabilir. AD bir fonksiyonun türevlerinin bilgisayar kodları yardımı ile nümerik olarak tespit edilmesidir. Bu türevler ne kadar kompleks olursa olsun programın kodlanması esnasında türev hesapları temel zincir kuralı (chain rule) yardımı ile tespit edilerek denklemlere dönüştürülür.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SU TEMİNİ VE TAŞKIN KORUMA KONTROL UYGULAMASI (UYG-A)

4.1. Çoklu Amaca Hizmet Eden Rezervuar Örneği

Çalışmanın ilk uygulama örneğinde (Uygulama-A ya da kısaca UYG-A olarak adlandırılmıştır) su temini ve taşkın kontrolünü içeren bir barajın kısa dönemli karar destek sistemi üzerinde çalışılmıştır. Seçilen çalışma yeri, Türkiye'nin Marmara Bölgesinde bulunan ve Kocaeli iline içme- kullanma suyu sağlayan Yuvacık Havzası ve baraj rezervuarıdır. Baraj gölüne su sağlayan 258 km^2'lik drenaj havzası, nehir ağı, baraj gölü ve meteorolojik (yağış, sıcaklık vb.) gözlem ölçüm istasyonları Şekil 4.1'de gösterilmiştir (Datum: World Geodetic System, 1984 ve Projeksiyon: Universal Transverse Mercator, 35. Kuzey Bölgesi üzerinde). Havzada 3 ana nehir kolu bulunmaktadır. Bu nehirler birleşerek baraj gölünü besler.



Şekil 4.1. *Yuvacık Baraj havzası, nehir ağı, ölçüm istasyonları ve baraj gölü*

Yuvacık Barajı, 1999 yılında inşaa edilmiş olup 108 metre yüksekliğinde ve kil çekirdekli toprak dolgu bir barajdır. Azami su kotu 169.8 m olmakla birlikte; depolama rezervuarı 169.3 m maksimum işletme kotunda 51.2 hm^3 aktif hacme sahiptir. Barajda depolanan nehir akımları, 3 adet su çıkış yapısı ile farklı amaçları olan deşarjlar yapabilmektedir. Bu çıkış yapıları,

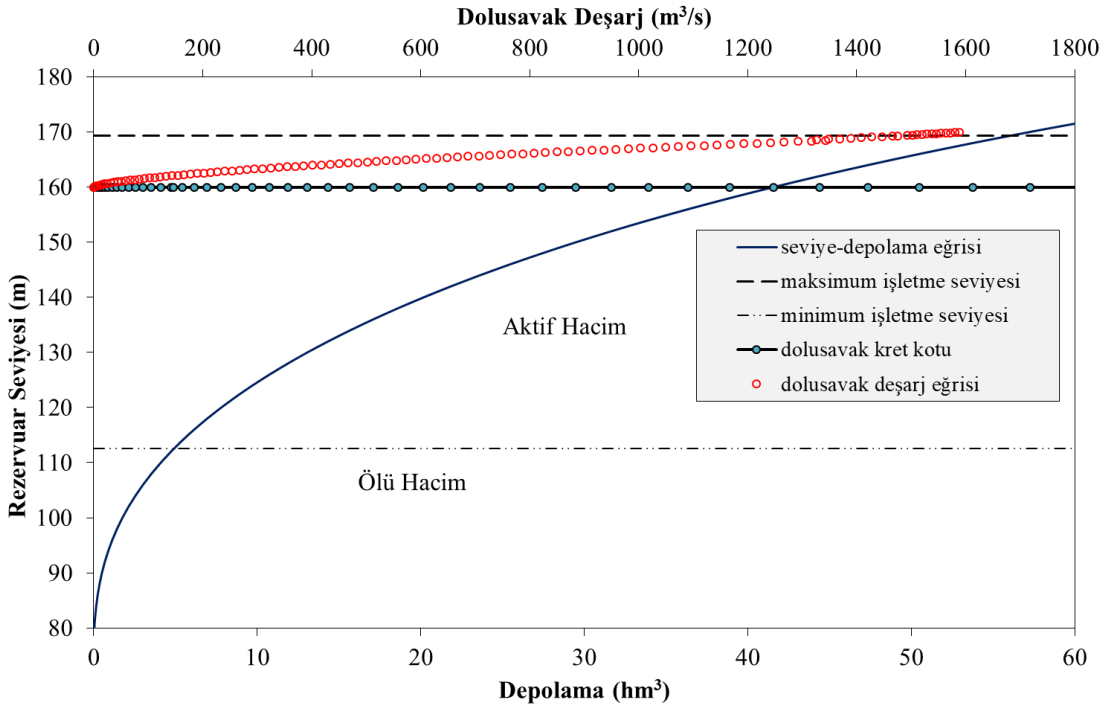
i. rezervuardan içme ve kullanma suyu çekmek için inşaa edilmiş olan su alma yapısı,
ii. baraj derivasyon tüneline cebri boru yerleştirilmesi ile acil durumlarda rezervuarı tamamen boşaltmak üzere tasarlanmış bir dip savak,
iii. üst seviyelerde fazla suyun rezervuar gölünden mansap kanalına deşarj edilmesi amacıyla inşaa edilmiş kontrollü (radyal kapaklı) dolusavak yapısıdır.

Baraj, işletme yönünden birbiri ile çelişen iki amaca (taşkın öteleme ve içme suyu sağlama) hizmet ettiğinden çoklu karakteristik bir yapıdadır. Normal koşullarda minimum su kotu (112.5 m) ile dolusavak kret kotu (159.95 m) arasında 36.60 hm^3 su depolanabilmektedir. Minimum su kotu altında kalan göl ölü hacmi ise 4.9 hm^3'tür. Dolusavak kret kotu üzerinden maksimum su kotuna kadar olan ve radyal kapaklar arkasında kalan hacimde ise 14.60 hm^3 su depolanabilmektedir.

Yapılan bilimsel çalışmaların ilk koşulu sistemlerin alt yapılarına bağlıdır. Baraj işletme çalışmalarının iyileştirilebilmesi de uzun yıllar kayıt edilmiş hidro-meteorolojik veri setleri ile mümkün olabilmektedir. Tasarım çalışmaları için aylık veriler yeterli olmasına rağmen kısa dönem işletme çalışmaları için gerekli olan günlük ve saatlik veriler her zaman ve yerde (yeterli alt yapı olmadığından) sağlanamamaktadır. Türkiye'deki su kaynakları yönetimini inceleyen Karadağ (2009), su kaynaklarına ait veri tabanı konusunda verilerin eksik olmasının etkili yönetim ve planların oluşturulmasını önlediğine değinmiştir. Bu açından; Yuvacık örneği; Literatür Bölümü'nde aktarıldığı üzere çeşitli proje tecrübeleri üzerine kuruluyor olması, baraj işletmecileri tarafından SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition, Veri Tabanlı Kontrol ve Gözetleme Sistemi) tabanlı Baraj Yönetim Sistemi geliştirilmiş olması ve saatlik mertebeye kadar ölçümlerin olmasından dolayı çalışma alanı olarak seçilmiştir. SCADA sistemi otomatik ölçüm araçlarından verilerin toplanması ve aktarılmasını sağlamaktadır. Bu alt yapı ile GBK ve MÖK gibi farklı işletim sistemlerini geliştirme ve kullanma imkanı sunar.

Baraj yapılmadan önce, baraj gövdesinin bulunduğu yerdeki Akım Gözlem İstasyon (AGİ) verilerine göre; 1964 – 1996 yılları arasında (33 yıl) ortalama akım yaklaşık olarak 220.8 hm^3 olarak hesaplanmıştır (DSİ, 1983). Baraj rezervuarı yaklaşık 1.5 milyon nüfusa sahip Kocaeli şehrine yılda 142 hm^3 içme ve kullanma suyu temin etmek üzere tasarlanmıştır. Baraj rezervuarı içinde yer alan su alma yapısı ile çekilen ham su, cebri borularla yakınlardaki içme suyu arıtma tesisine taşınarak şehre su temin etmektedir. Baraj hacmi kısıtlı olduğundan, seviye kontrolü (bir önceki yıla ait Ekim ayında başlayıp mevcut yıla ait Eylül ayında biten) su yılı döngüsü içerisinde belirli bir miktarda fazla suyun dolusavaklar ile deşarj kanalına (mansap kanalı olarak da adlandırılır) regüle edilmesiyle yapılmaktadır. Rezervuarın fiziksel verilerine ait hacim-satıh eğrisi ve dolusavak deşarj eğrisi Şekil 4.2'de verilmiştir. Güncel pratiklere ve işletme hedeflerine göre baraj, yaz aylarında kesintisiz su verebilmesi için kurak yaz dönemi (Temmuz – Eylül) öncesinde tam doldurulmalıdır. Tam dolu rezervuar, kurak dönemde depodaki suyu kullanarak şehir şebeke hattını besler. Islak dönemde (su yılı başında da) boşalan depo hacminin tekrar doldurulması gerekmektedir. Bu esnada da, taşkın riskini arttırmamak için suyun dolusavak kret kotu üstünde depolanmasına hemen geçilmemesi ve belirli bir hacmin taşkın öteleme için boş tutulması gerekmektedir. Yeniden doldurma (refilling) denilen süreç ise prensipte baraj giriş akımlarına göre yıldan yıla değişmektedir. Bunun yanısıra havza topoğrafyasından ötürü, özellikle Mart – Nisan aylarında baraj gölü yüksek miktarda kar erimesine bağlı giriş akımlarından beslenmektedir. Üst kotlarda bulunan mevcut kar örtüsü (kar örtüsü üzerine yağan yağmura veya ani hava sıcaklığına bağlı çok hızlı erime gibi durumlarda) rezervuara ani yüksek akımlar getirerek taşkın riski yaratmaktadır.

Bir diğer durum ise, bazı kurak yıllarda giriş akımlarının ortalamanın çok altına düşmesidir. Örneğin; DSİ raporlarından takip edildiği üzere, 1985 ve 1994 yıllarında kaydedilen giriş akımları hacim toplamı 110 hm^3'lerde kalarak kurak dönemler yaşanmıştır. Uzun dönem veri analizlerine göre, kuraklık riski yaklaşık % 12 olarak hesaplanmaktadır; bu ise 8 yılda 1 kurak yıla tekabül etmektedir (www.izmitsu.com.tr). Bu gibi kuraklık baskısı ile işletmeciler; herhangi bir su kesintisine yol açmamak için (kuraklık riskini azaltmak amacıyla) maksimum su seviyesine kademeli olarak fakat içme su teminin de riske atmayacak kadar erken bir zamanda ulaşmak istemektedirler.



Şekil 4.2 *Rezervuar hacim-seviye eğrisi ve dolusavak deşarj eğirisi*

Kocaeli Belediyesi tarafından günlük işletme stratejileri için mansap kanalı fiziksel durumu ve yan derelerden katılabilecek akımları da göz önünde bulundururarak kabul edilebilir deşarj miktarını 100 m^3/s olarak belirlemiştir. Ancak, yüksek pikli ve kısa süreli taşkın koşullarında (örneğin, 24 saat içinde 100 yılda bir gelebilecek olası taşkın hidrografının gözlenmesi gibi) saatlik limitin 200 m^3/s'ye çıkarılmasına müsade edilmektedir. Bu durumunun iki fiziksel sebebi bulunmaktadır. 12 km uzunluğundaki mansap kanalı, ilk olarak kırsal yerleşim yeri bulunan dar bir vadiden geçmektedir. Devamında ise, eski ana dere hattından derive edilerek inşa edilen betonarme bir kanal ile keskin bir dönüş yaparak sanayi ve şehir bölgesinden geçerek Marmara Denizi'ne dökülmektedir. Bu açıdan, olası bir taşkın durumu hem dar vadide yükselerek hem de sonrasında inşaa edilen kanaldan taşarak maddi hasar ve can kayıplarına neden olabilecek bir yapıdadır.

Fiziksel durumlara ait kısıtlar (GBK ve MÖK'ne ait sınır koşulları) sistem çözümü açısından hard (katı) kısıtlardır. Bu seviyelerin aşılma durumunda, telafisi mümkün olmayan (insan hayatına doğrudan etki eden uzun süreli su kesintisi veya en kötü senaryo baraj yıkılması) sonuçlar doğurabilir.

Bu durumda koşullar özetlenecek olursa:

1. Rezervuar, mevcut aktif hacme ait göl seviyeleri arasında işletilmelidir. Bu ise, 112.5 m olan ölü hacim seviyesi ile (yukarıda açıklanan hidrolojik durum ve şehir ihtiyacı gözetilerek) 169.2 m olan maksimum işletme seviyesi arasında etkili bir kontrol stratejisi gerektirmektedir.
2. Kontrollü çıkış yapısı kısıtı olarak (yukarıda açıklanan sebeplerden ötürü) günlük 100 m^3/s, saatlik 200 m^3/s üst limit değerler gözetilmelidir. Ayrıca, bu değerler dolusavak deşarj eğrisine bağlı olarak da belirli bir seviye üzerinde olmalı ve mevcut seviye için de maksimum değerlerle kısıtlanmalıdır. Burada, dolusavak kapakları tam açık olması durumunda; örneğin 159.95 m su seviyesi ve altında sıfır iken, Şekil 4.2'den seçilen rastgele bir seviye için (162.05 m) su seviyesinde eğriye ait okumadan deşarjın 142.93 m^3/s'yi fiziksel olarak geçmesi mümkün olmadığı görülmektedir. Bu fiziksel koşulun da modellere yansıtılması önemlidir.
3. Her ne olursa olsun baraj güvenliği tehlikeye atılmamalıdır. Bu açıdan, suyun barajın üstünden aşmasını engellemeyi önlemenin gerektiği durumlarda işletme esnasında dolusavak deşarj limitleri mansap kanalı limitlerini aşabilir.
4. Kocaeli şehri içme suyu ihtiyacı sürekli olarak sağlanmalıdır. Bunun için şehre verilen su miktarları sisteme tanımlanmalı ve ilgili çıkış yapısından çekilmelidir.

4.2. Model Kurulumu

Model kurulumu için kritik aşamalar şunlardır:

i. Çalışma alanına ait girdi, çıktı ve fiziksel durumların tespit edilmesi,
ii. Sistem süreklilik denklemlerinin (dinamik) tanımlanması,
iii. İşletimsel ve çevresel kısıtların tanımlanması,
iv. Optimizasyon amaç fonsiyonun tanımlanması.

Setler

$k(gün/saat)$: zaman aralığı $(k \in T = \{1,2,3,\dots,N\})$

i : amaç fonksiyonu ağırlık sayısı

Skalerler

$H_{min}\ (m)$	: Minimum rezervuar seviyesi
$H_{mak}(m)$	: Maksimum rezervuar işletme seviyesi
$H_0\ (m)$	: Başlangıç rezervuar seviyesi
$Qs_{lim}(m^3/s)$	: Dolusavaktan bırakılabilecek maksimum taşkın limit deşarjı
$Qs_{min}(m^3/s)$	: Dolusavaktan bırakabilecek minimum deşarj
$Qt_{min}(m^3/s)$	: Minimum türbin deşarjı
$Qt_{mak}(m^3/s)$	: Maksimum türbin deşarjı
N	: Gün/saat sayısı (tahmin ufku)

Parametreler

$Q_I^k(m^3/s)$	: Rezervuar giriş akımı
$Q_{WS}^k(m^3/s)$	: Rezervuardan çekilen su miktarı

Değişkenler

$Qs^k(m^3/s)$	: k zamanında dolusavak deşarjı
$H^k(m)$	: k zamanında rezervuardan çekilen su
RE^k	: k zamanında RE değeri
$H_{RE}^k(m)$	: k zamanında RE seviyesi
$Qt^k(m^3/s)$	: k zamanında hidroelektrik için türbinden bırakılan su
$s^k(m^3)$	: k zamanında rezervuar hacmi
$r^k(m^3)$	: k zamanında atık değeri (residuum)
w_i	: Amaç fonksiyonu i. ağırlığı
$Qs_{fmak}^k(m^3/s)$	: k anında rezervuar seviyesine göre dolusavaktan bırakılabilecek fiziksel maksimum deşarjı

Model kısıtları

Optimizasyon kısıtları, eşitlik ve eşitsizliklerle ifade edilmektedir. Süreklilik denklemi gözeterek, ilk eşitlik kısıtı olarak girdi ve çıktı değişkenleri arasında sağlama yapmak amacıyla "atık" (residuum, r^k) değişkeni tanımlanmıştır. Bu değişkene ait değerlerin her koşulda sıfırı sağlaması fiziksel bir çözüm temini ve optimizasyon çözümünün gerçekçi olup olmadığının kontrolü açısından önemlidir. Bu amaçla;

Denklem 4.1'de optimizasyon atık eşitliği bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır ve sıfıra eşitlenmiştir:

$$r^k = s^k - s^{k-1} + \Delta t\left(Q_I^k - Q_S^k - Q_{WS}^k\right) = 0 \tag{4.1}$$

Diğer yandan, göl seviyesi fiziksel koşullarına ait katı kısıtlar Denklem (4.2)'de tanımlanmıştır:

$$H_{min} \leq H^k \leq H_{mak} \tag{4.2}$$

Dolusavak deşarjları minimum ve maksimum fiziksel değerler arasında olmalıdır. Bu amaçla, Denklem (4.3)'te tanımlanmıştır.

$$Qs_{min} \leq Qs^k \leq Qs_{fmak}^k \tag{4.3}$$

$$Qs_{fmak}^k = f_{dde}(H^k) \tag{4.4}$$

Burada, f_{dde} dolusavak deşarj eğrisidir. Qs_{min} bir alt koşul olmadığından sıfıra eşittir. Sistemde ayrıca hidroelektrik enerji üretimi için türbinden bırakılan su miktarına ait (Denklem (4.5) ile tanımlanan) bir kısıt mevcuttur. Bu kısıtın minimum ve maksimum değerleri UYG-A için sıfırdır.

$$Qt_{min} \leq Qt^k \leq Qt_{mak} \tag{4.5}$$

Amaç Fonksiyonu

Genel bir amaç fonksiyonu (Denklem 3.9), UYG-A için rezervuar seviyesi ve kontrollü dolusavak deşarjlarına ait birden fazla kontrol değişkeni içermektedir; ve Denklem (4.6) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} &\min J(H, Qs) \\ &H, Qs \in \{0, \dots, T\} \end{aligned} = \\ w_1 \sum_{k=1}^{N} (H_{mak} - H^k) + w_2 \sum_{k=1}^{N} (Qs^k) + w_3 \sum_{k=1}^{N} mak(Qs^k - Qs_{lim}, 0)^2 \\ + w_4 \sum_{k=1}^{N} mak\left(H^k - H_{RE}^k, 0\right)^2 + w_5 \sum_{k=1}^{n} mak(Qs^{k+1} - Qs^k)^2 \tag{4.6}$$

Her bir terim; fiziksel koşullara kıyasla (yukarıda katı kısıtlar olarak ifade edilmişlerdir) işletimsel hedeflerdir ve genellikle *yumuşak (soft) kısıtlar* olarak da adlandırılırlar. Yumuşak kısıt; işletimsel olarak tercih edilmeyen, fakat aşılması durumunda telafisi mümkün olmayan zararlar doğurmayan kısıtlardır. Kısıtlı depolama

hacmine sahip bir rezervuarda çalışıldığı düşünülürse; amaç fonsiyonu elemanları sırasıyla şöyle açıklanır:

i. İlk terim, rezervuarı sürekli olarak maksimum su seviyesine çıkarmak için eklenmiştir. Maksimum seviye ile kontrol edilen seviye arasındaki farkların minimize edilmesi ile tanımlanır.

ii. Bu terim ile sadece gereken durumlarda fazla suyun dolusavaktan deşarj edilmesi hedeflenerek; dolusavak deşarjlarını minimize etmektedir.

iii. Üçüncü kısıt dolusavak deşarjlarını belirli bir taşkın limiti (set point)'da tutmak için tanımlanmıştır. Bu değer, günlük işletme için 100 m^3/s, saatlik için 200 m^3/s alınmıştır.

iv. Mevcut (kullanılabilir) bir rezervuar seviye ayar noktası (sabit ya da zamansal olarak değişen Rehber Eğri) olması durumunda, dördüncü terim ile bu hedeften sapmaların karesi minimize edilir.

v. Radyal kapakların sürekli olarak ayarlanması mekanik açıdan çok verimli olmayacağından; son olarak, ardışık deşarjlar arası sapmanın karesini de minimize edecek bir terim eklenmiştir. Bu terim, özellikle kısa zaman aralığında daha büyük önem arz ettiğinden sadece saatlik modelde kullanılmıştır.

Üçüncü ve dördüncü terimler, belirli bir kritik seviyenin (ayar noktası) aşılması durumunda geçerli olduğundan, negatif sapmaları ayırmak için bir maksimum değer fonksiyonu içinde ifade edilmiştir. Optimizasyon ağırlıkları bu çalışmada deneme-yanılma yöntemi ile bulunmuştur; farklı çalışmalarda farklı değerler alınabilir.

4.3. Testler ve Sonuçları

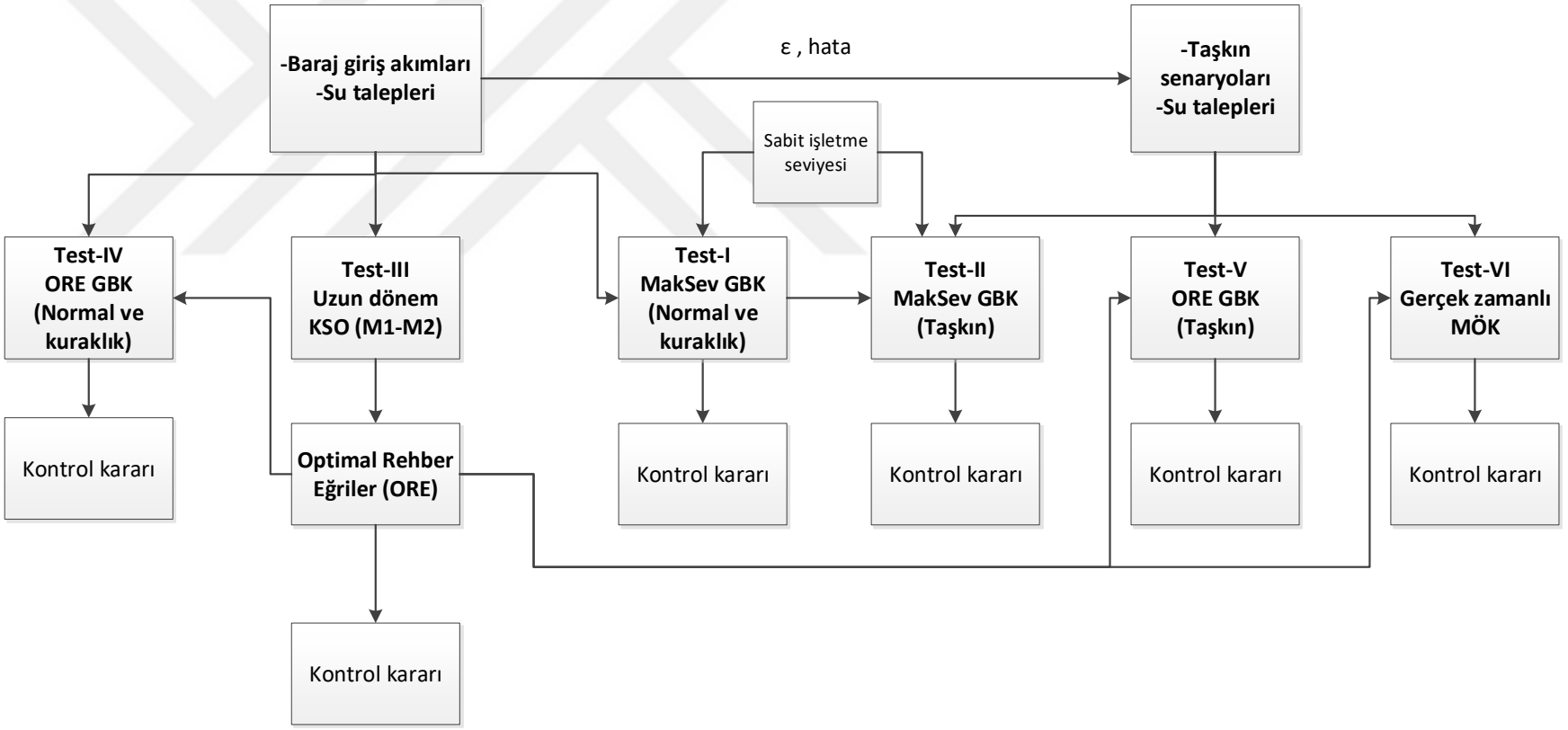
Bu bölümde, kurulan optimizasyon modeli ile yapılan farklı testler sunulmuştur.

4.3.1. Günlük işletme modeli kurulumu

Çalışmaya geçmişte elde edilen aylık RE'nin GBK'de değerlendirilmesi ile başlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak New Castle (2001) aylık çalışmalardan elde edilen maksimum seviye RE test edilmiştir. Sürekli su temini için neredeyse her ay maksimuma yakın işletme öneren bu eğri günlük bir GBK işletme stratejisinde test edilmiştir. Maksimum RE'nin yetersiz kaldığı durumda ise bu çalışma içerisinde yeni bir RE arayışına gidilmiştir.

Modellemeye ait genel bir akış şeması ile geliştirilen günlük işletme modeli sisteminin aşamaları her iki metotu da (detaylı anlatımları Bölüm 3'te sunulmuş olan GBK ve MÖK) kapsayacak şekilde Şekil 4.3'te sunulmuştur. GBK, rezervuar simülasyon modelini kullanarak; sabit veya zamansal değişen RE ve işletimsel kısıtlar altında deşarj kararları alınmasını sağlar.

Buna karşılık, MÖK kullanımı ise iki amaç gözetir; birinci olarak optimum RE belirlemek ve ikinci olarak kısa dönemli kontrol yapmaktır. Rehber eğri oluşturmak için uzun dönem gözlenmiş akım girdi verileri deterministik bir optimizasyonda çalıştırılarak optimum işletme kararları belirlenir. Bu yöntem, kısaca Kapalı Stokastik Optimizasyon'a (KSO, Implicit Stochastic Optimization) benzemektedir ve problemin stokastik durumu (akımlardaki belirsizlik) örtük (kapalı, dolaylı) bir şekilde sisteme yansıtılmaktadır. Şu unutulmamalıdır ki, bu sadece teorik olarak bir optimum durumdur; çünkü gerçek zamanlı bir işletmede mükemmel akım tahminleri imkansızdır ve birçok farklı hata tahminlerde belirsizliğe yola açmaktadır. Bu açıdan, değişken rehber eğrileri oluşturulmasına yardımcı olur. Sonrasında ise, baraj giriş akımları çeşitli katsayılar ile azaltılarak ve arttırılarak akım senaryoları oluşturulmuş ve KSO sonuçları GBK'de sorgulanmıştır. İkinci amaçta ise 2-3 günlük tahmin ufkunda kapalı döngü MÖK ile taşkın öteleme yapılmıştır. Akış şemasında, her bir adımda test numarası ile belirtilerek çalışmanın daha kolay takibi sağlanmıştır.

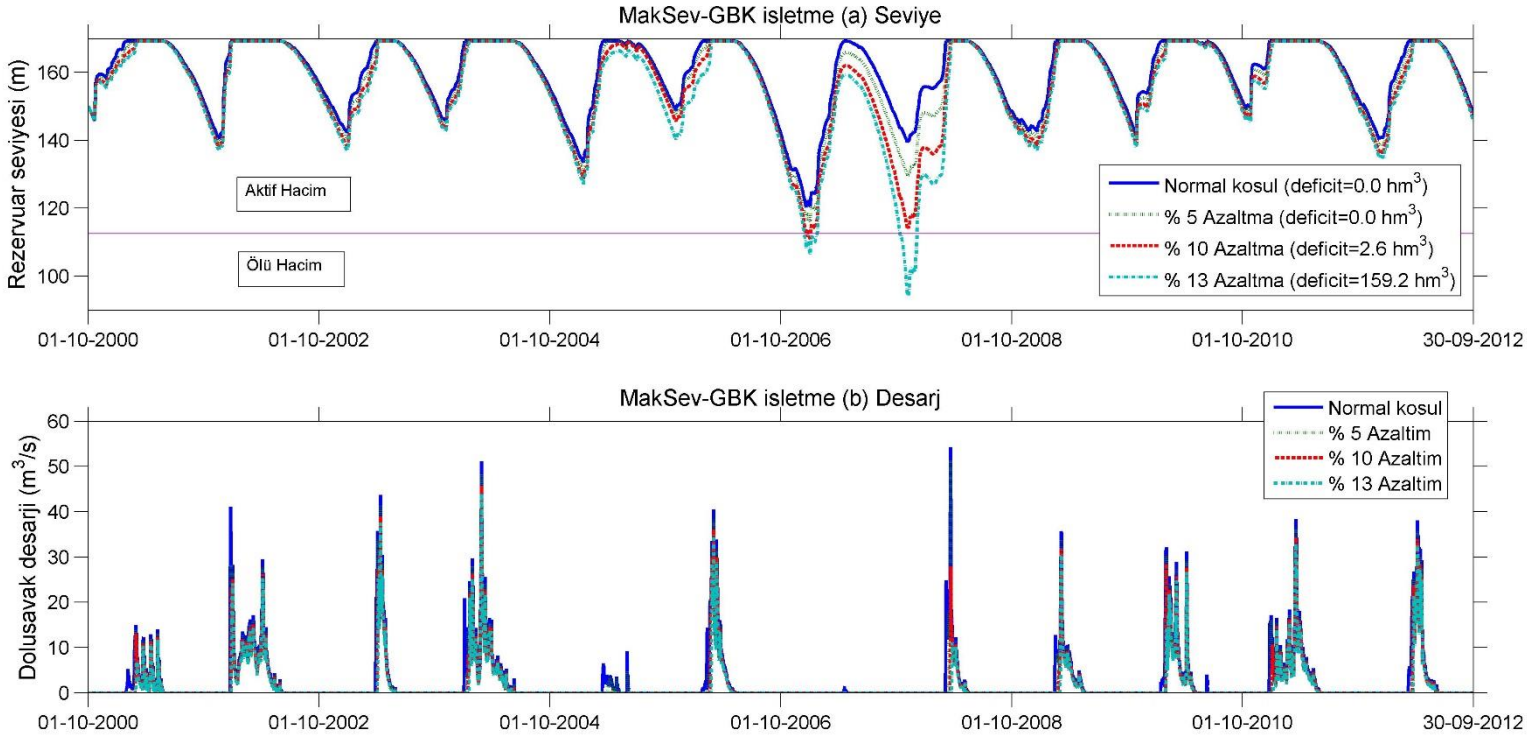


Şekil 4.3 *Günlük işletme kontrol modelleri hiyerarşisi ve test numaraları*

4.3.1.1. Su temini tabanlı GBK testleri (Test-I & Test-II)

İlk aşamada herhangi bir optimizasyon çalışması yapılmadan mevcut su hedefleri ile GBK işletme yapılması durumu (taşkın koşulu gözardı edilerek) incelenmiştir. Bu sonuçlar, sonraki çalışmalarda değerlendirmek üzere su temini açısından en iyi senaryo olarak referans alınmıştır. İşletme iki temel kural üzerinde kurulmuştur. İlk olarak sürekli (tüm sezonda) maksimum seviyede depolama, ikinci olarak ise günlük 100 m^3/s'ye kadar izin verilen maksimum dolusavak deşarjıdır. Bu GBK işletme seti Test-I ve Test-II için "Maksimum Seviye İşletme Geri Beslemeli Kontrol (MakSev-GBK) olarak adlandırılmıştır. Yaklaşım öncelikle gözlem giriş akımları ve farklı hidrolojik koşulları temsil edebilmek için azaltılmış senaryo akımlarla incelenmiştir (Şekil 4.4, Test-I).

Sonuçlar (Test-I) su temini açısından farklarını (deficit) da içerecek şekilde sunulmuştur. Buna göre; rezervuar (değerlendirme aralığında) sürekli doldurma stratejisine göre işletilirse, rezervuar seviyesi kritik seviyeye inmediğinden baraj giriş akımlarında yaklaşık % 10 azalma olana kadar şehre kesintisiz su sağlayabilmektedir. Buna rağmen, giriş akımlarında % 13 azalma olması durumunda (dolusavaktan deşarj yapılmasa da) rezervuar seviyesi ölü hacmin de altına düşmekte ve kuraklık durumu oluşmaktadır (Şekil 4.4). 2006 yılındaki kurak sezondan ötürü, devam eden 2007 yılı işletmesinde başlangıç seviyesi çok düşük olduğundan rezervuar tam doldurulamamaktadır. Bu sebeplerle, %13 senaryosunda su açığı 100 hm^3'lerin üzerine çıkmıştır. Barajın aktif hacmi dikkate alınırsa bu hacim, neredeyse baraj hacminin iki katıdır. Bu çalışma, ancak % 13 azaltma senaryosuna kadar incelenebilmektedir. Bu değerin altındaki durumlarda, rezervuar seviyesi ölü hacim seviyesi alt kotunun da sınırlarına ulaştığından çözüm yapılamamaktadır. Normal koşullarda, % 13 azaltmanın da işletimsel olarak uygulanabilir olduğu söylenmez, öte yandan bu gibi bir kötü durum senaryosunda gerekli su açığı hacimlerini gösterebilmek açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.4 *Normal durum ve kuraklık durumları için MakSev-GBK sonuçları (Test-I) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]*

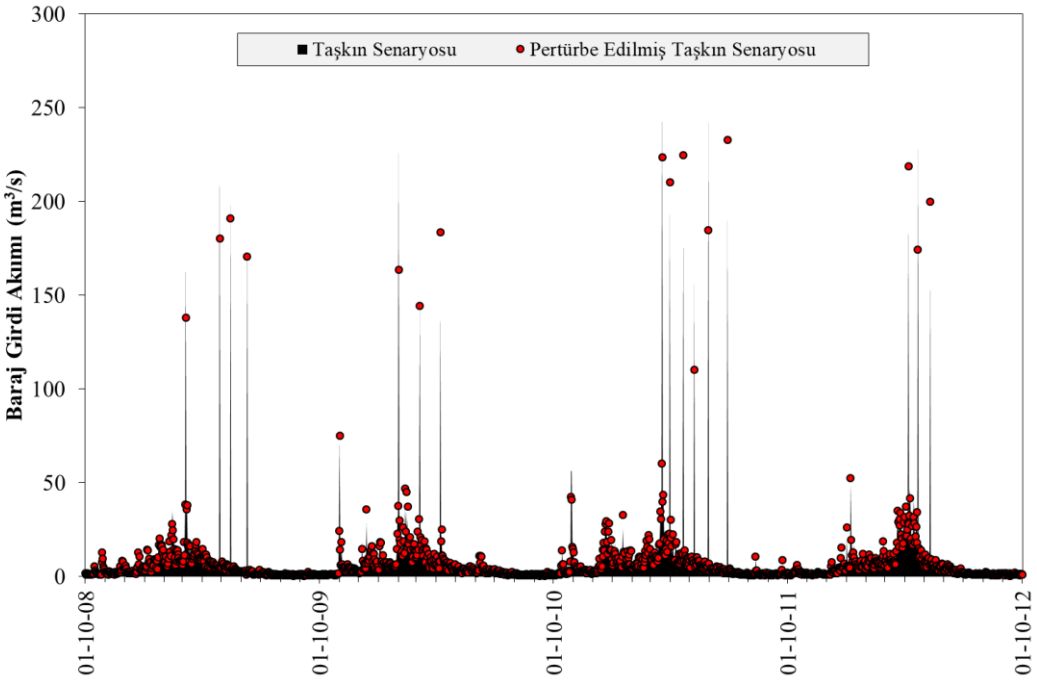
MakSev-GBK işletimsel açıdan oldukça kolay uygulabilir ve kesintisiz su teminini minimum riskte tuttuğundan yalnızca su temini amacı için en güvenilir işletmedir. Sürekli maksimum seviyede işletme yapmanın taşkın durumundaki (baraja ani yüksek değerde giriş akımı girmesi durumu) kritik etkileri olabilir. Bu amaçla, son 4 su yılı seçilerek (2009 – 2012) genellikle rezervuarın dolu olduğu zamanlarda gerçekleşmesi düşünülerek, farklı 16 günde yüksek giriş akım değerleri sağlanarak basit bir taşkın senaryosu oluşturulmuş ve test edilmiştir (Test-II). Taşkınlar zamansal olarak değişken hidrograflar olarak değil, maksimum günlük pik değerler olarak sadece belirli günlere uygulanmıştır. Taşkınlar, sürekli gözlenebilir değerler olmadıklarından sıklıkla istatistiksel metotlarla belirlenirler. Bu çalışmada da gerçekçi bir taşkın piki seçebilmek için, baraja ait 24 saatlik gelmesi muhtemel taşkın hidrograflarından yararlanılmıştır. Havzanın farklı risklere göre (5, 10, 50 ve 100 yılda bir gelmesi muhtemel gibi) sentetik metotlarla üretilmiş taşkın hidrograflarından yararlanılmıştır.

Akım gözlemlerine uygulanan arttırımlar, çalışma alanına ait sentetik taşkın hidrografları da incelenerek oluşturulmuştur. Havzaya ait pik akım toplanma süresi 6 saat olduğundan, günlük modelde 24 saatlik hidrograflar hesaplanarak günlük pik akımlar bulunmuştur. Buna göre, 100 yıl içinde beklenen olası saatlik pik akım 600 m^3/s iken günlük olarak 198.2 m^3/s'ye tekabül etmektedir. Taşkın senaryolarına ait grafik Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu bilgiler ışığında çalışmada da taşkın koşulu için iki önemli kriter gözetilmiştir:

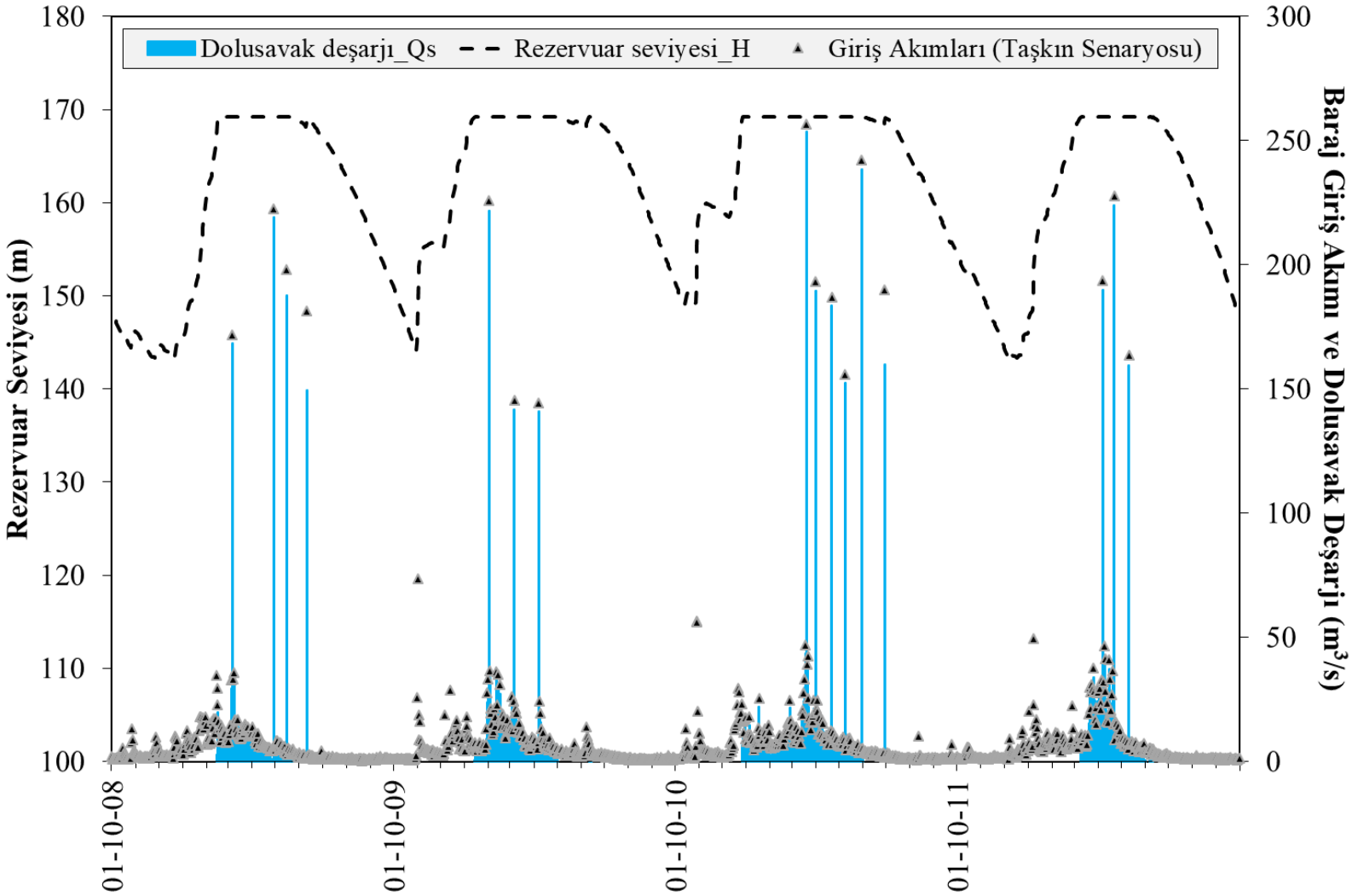
i. *Günlük maksimum olası taşkın değeri:* Günlük maksimum değerler, yaklaşık olarak 100 yıllık saatlik pik değerin günlük karşılığına tekabül edecek değerlere yakın şekilde seçilmiştir.
ii. *Kritik dönemler:* Senaryoların ana-taşkın sezonlarında seçilmesi, böylece de rezervuar kotlarının barajın dolum esnasında ya da tam dolu olduğu dönemlere denk getirilmesine dikkat edilmiştir.

Taşkın senaryosuna ait MakSev-GBK (Test-II) sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu yaklaşımın taşkın koşulundaki mansap kanalı güvenli işletimi dezavantajları özellikle rezervuarın tam dolu olduğu zamanlarda ön plana çıkmaktadır. Sadece su temini tabanlı bir strateji kaçınılmaz olarak taşkın durumu yaratmaktadır. Aksi halde, barajda boş hacim olmadığından, suyun barajın üzerinden geçmesi durumunda bu gibi kil dolgu bir barajda, barajın yıkılmasına ve katastrofik sonuçlar yaşanmasına sebep olur. Bu nedenle, öncül ve basit yaklaşım, sadece su temini amaçlı bir işletmenin mümkün

olmadığını ve sürekli maksimumda tutulan RE'de iyileştirme yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu durum, işletme çalışmalarını ıslak sezonda daha düşük seviyede kalınarak kurak sezona doğru seviyenin yükseltildiği zamansal olarak değişken bir politika arayışına yöneltmektedir. Bu arayış, bir sonraki bölümde uzun dönemli bir optimizasyon çalışması ile ortaya konmaya çalışılacaktır.



Şekil 4.5 *Günlük testler için oluşturulan taşkın senayosu ve pertürbe edilmiş taşkın senaryosu*



Şekil 4.6 *Taşkın durumu için MakSev-GBK sonuçları (Test-II) (Dolusavak deşarjı [m³/s], Rezervuar seviyesi [m], Giriş akımları [m³/s])*

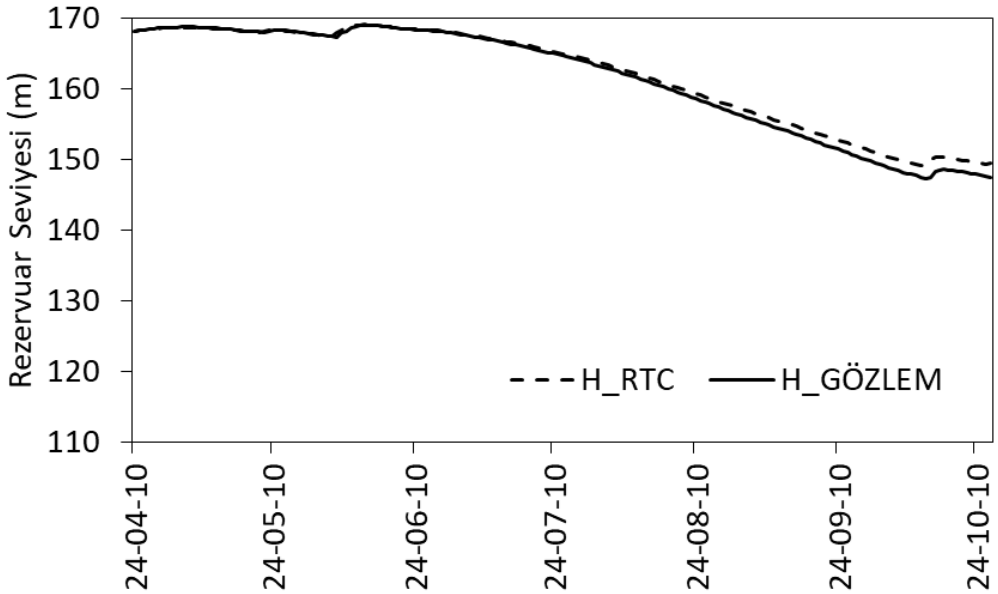
4.3.1.2. Uzun dönem kapalı stokastik optimizasyon ile rehber eğrinin oluşturulması, (Test-III)

Bu kısmın ana amacı, zamansal olarak değişken (zamana bağlı değişen/dönemsel) bir RE çıkartmaktır. Aylık RE yerine günlük hassasiyette RE çıkarılması hedeflenmiştir. Bu ise, Kapalı Stokastik Optimizasyon (KSO) yaklaşımı ile geçmiş yıllarak ait günlük verinin MÖK'de açık-döngü optimizasyonu ile gerçekleştirilmiştir. van Overloop (2006), geliştirilen kontrol sistemlerinin gerekli ihtiyaçlar ve kısıtları sağlayacak şekilde olabildiğince basitleştirilmesi gerekliliğini göstermiştir. Bu açıdan bir amaç fonsiyonu tasarlandığında öncelikli olarak Denklem (4.6)'nın ilk üç terimi dikkate alan bir model oluşturulmuştur (Model_1 ya da kısaca M1 olarak adlandırılmıştır). Bu aşamada, günlük bir model üzerinde çalışıldığından ve işletimsel olarak aciliyet hasıl olmadığından, zamansal ardışık dolusavak deşarj geçişleri kısıtlanmamıştır. Bu amaç fonsiyonunun, deneme-yanılma yöntemleri ile tespit edilmiş ağırlıkları şu şekilde olacaktır:

$$\min_{H,Qs \in \{0,\dots,T\}} J(H,Qs) = w_1 \sum_{k=1}^{N} (169.2 - H^k) + w_2 \sum_{k=1}^{N} (Qs^k) + w_3 \sum_{k=1}^{N} mak(Qs^k - 100{,}0)^2 \qquad (4.7)$$

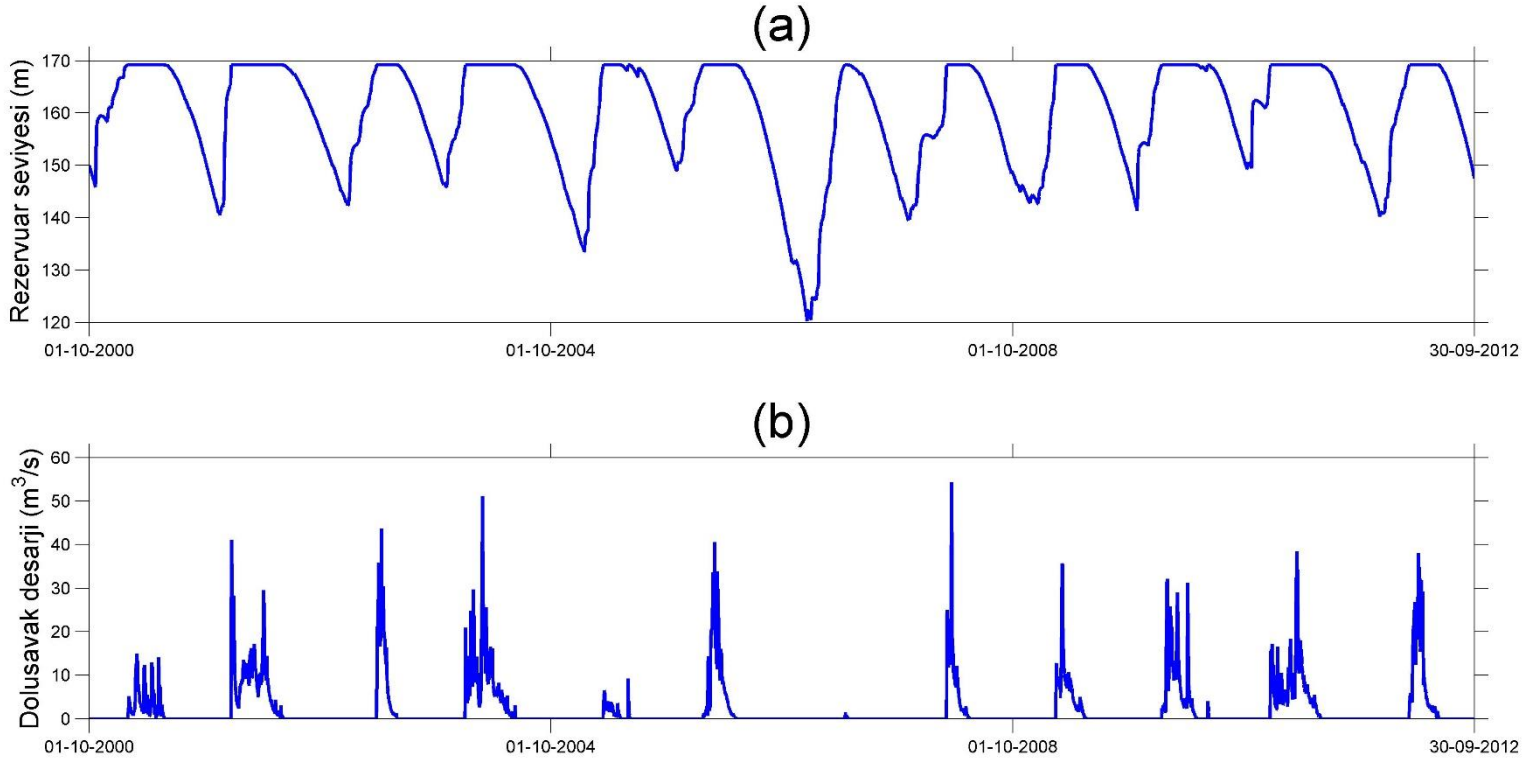
Burada; H_{mak}=169.2 m ve Qs_{lim} ise 100 m^3/s alınmıştır. Ağırlıklar (w) ise w_1 ve w_2=1, w_3=10'dur. k (gün): zaman aralığı ($k \in T = \{1,2,3,\dots,N = 4383\}$.

Model Doğrulama: Geliştirilen M1 modeli, özellikle dolusavak deşarjlarının olmadığı bir zaman aralığında gerçek veriler ile doğrulanmıştır. Elde edilen rezervuar seviyesi (model çıktısı), gözlem rezervuar seviye değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.7) ve rezervuar su seviyeleri ile model sonuçları arasındaki uyumun yeterli olduğu görülmektedir. Bunun dışında her optimizasyon uygulamasında kütle dengesi kontrolü için atık (residuum) durum değişkeni incelenmiştir. Bu değer, süreklilik denkleminin bir sağlaması niteliğindedir. Optimizasyon sonucunda optimizasyon algoritması (IPOPT) performans değerleri (tolerans değeri, iterasyon sayısı, vb..) de kontrol edilerek global çözüme ne kadar yaklaştığına da bakılmıştır.



Şekil 4.7 *2010 yılı deşaj olmayan dönem optimizasyon (RTC) ve gözlem seviye sonuçları karşılaştırması (model doğrulaması)*

M1 modeli öncül optimizasyon sonuçlarına ait rezervuar seviyesi ve dolusavak deşarjları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Model, 12 yıla ait 4383 günlük veri girdi yapılarak bir kez çalıştırılmıştır. Optimizasyon yapılan zaman aralığında taşkın yaratacak bir giriş akımı gözlenmemiştir. Su temini tabanlı hedeflere varıldığı ve barajın su kesintisine mahal vermeden işletildiği söylenebilir. Geçmiş yıllar giriş akımlarının doğrudan (azaltma yapılmadan) kullanıldığı modelde en düşük rezervuar seviyesi 120.2 m olarak gözlenmiştir. Bu seviye, 112.5 m minimum işletme seviyesinin üzerinde olmakla beraber kuraklığın yaşandığı 2006 su yılı sonrasında 2007 su yılı başında gözlenmiştir. Şekil 4.8 optimizasyon sonuçlarına göre rezervuar hacminin yeniden doldurmaya başlama zamanı yıldan yıla değişkenlik göstermektedir. En kritik karar bunun genel bir işletme prosedüründe nasıl olacağını belirlemektir. Gözlenen 12 yıllık günlük süreç içerisinde giriş akımlarında ciddi bir taşkın olayı olmadığından, optimizasyon sonuçlarının en büyük eksikliği depolamayı taşkın sezonundan önce yapması ve maksimum seviyeye istenilenden erken ulaşarak taşkın riskini arttırmasıdır. Bu açıdan, elde edilen optimizasyon sonuçları çeşitli regresyon ve analizlerle genelleştirilmiş bir RE çıkarılmasını sağlayabilir.



Şekil 4.8 *M1 modeli uzun dönem KSO sonuçları (Test-III) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]*

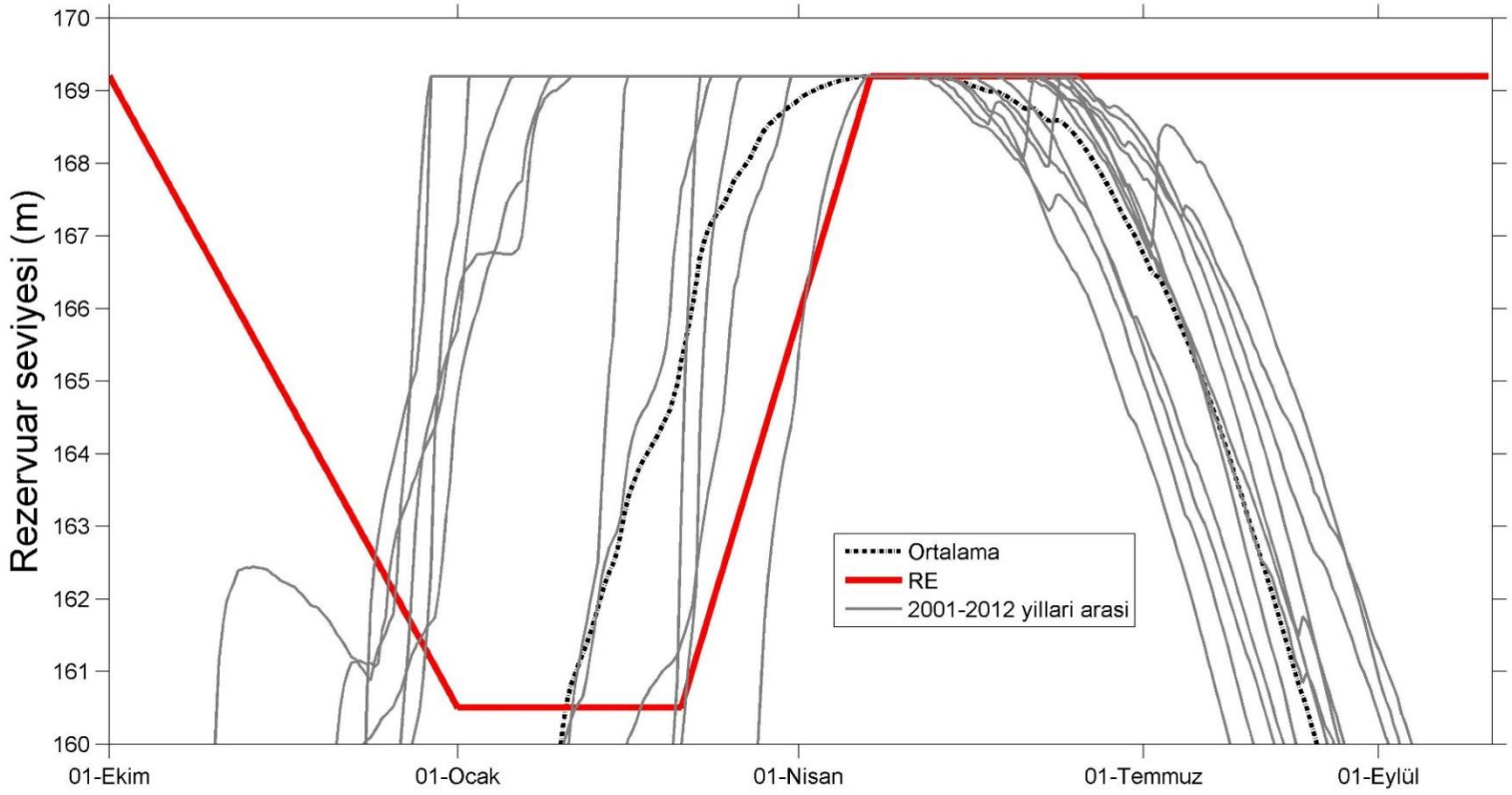
Radyal kapakların etkin olduğu kritik seviye aralığı (dolusavak kret kotu ve maksimum rezervuar seviyesi arası), yeniden dolum politikasını geliştirmek üzere analiz edilmiştir. Bir kere çalıştırılarak elde edilmiş M1 modeli 12 yıla ait rezervuar seviye sonuçları bir yıl zaman ölçeğinde çizdirilerek, radyal kapakların hangi zamanda kapatılması ve dolusavak kret kotu üstünde depolama yapılması gerektiği sorgulanmıştır (Şekil 4.9). Buna göre, her yıl arasında yüksek farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Ortalamalar alındığında yeniden doldurma süresinin Şubat-Mayıs aralığında olduğu söylenebilir. Kapakların en geç Mart başında kapatılması gerektiği tespit edilse de rezervuarın en son hangi tarihte tam dolu olması gerektiği çok açık değildir. Bu süre bilinebilirse aradaki dönem kademeli olarak seviye arttırımı yapılarak tespit edilebilir. Bu amaçla, maksimum seviyeye ulaşan farklı dolum politikaları (01 Nisan, 15 Nisan, 01 Mayıs, 15 Mayıs gibi) test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, maksimum seviye 20 Nisan seçilerek zamansal olarak değişken RE (Şekil 4.9'da kesikli çizgi ile gösterilmiştir) oluşturulmuştur.

Bu eğri ("Optimal Rehber Eğri, ORE" olarak adlandırılarak) ise M1 modeline ayrı bir (yumuşak) kısıt olarak eklenmiş ve M2 modeli oluşturulmuştur. Güncellenmiş amaç fonsiyonunun yeni hali şu şekildedir:

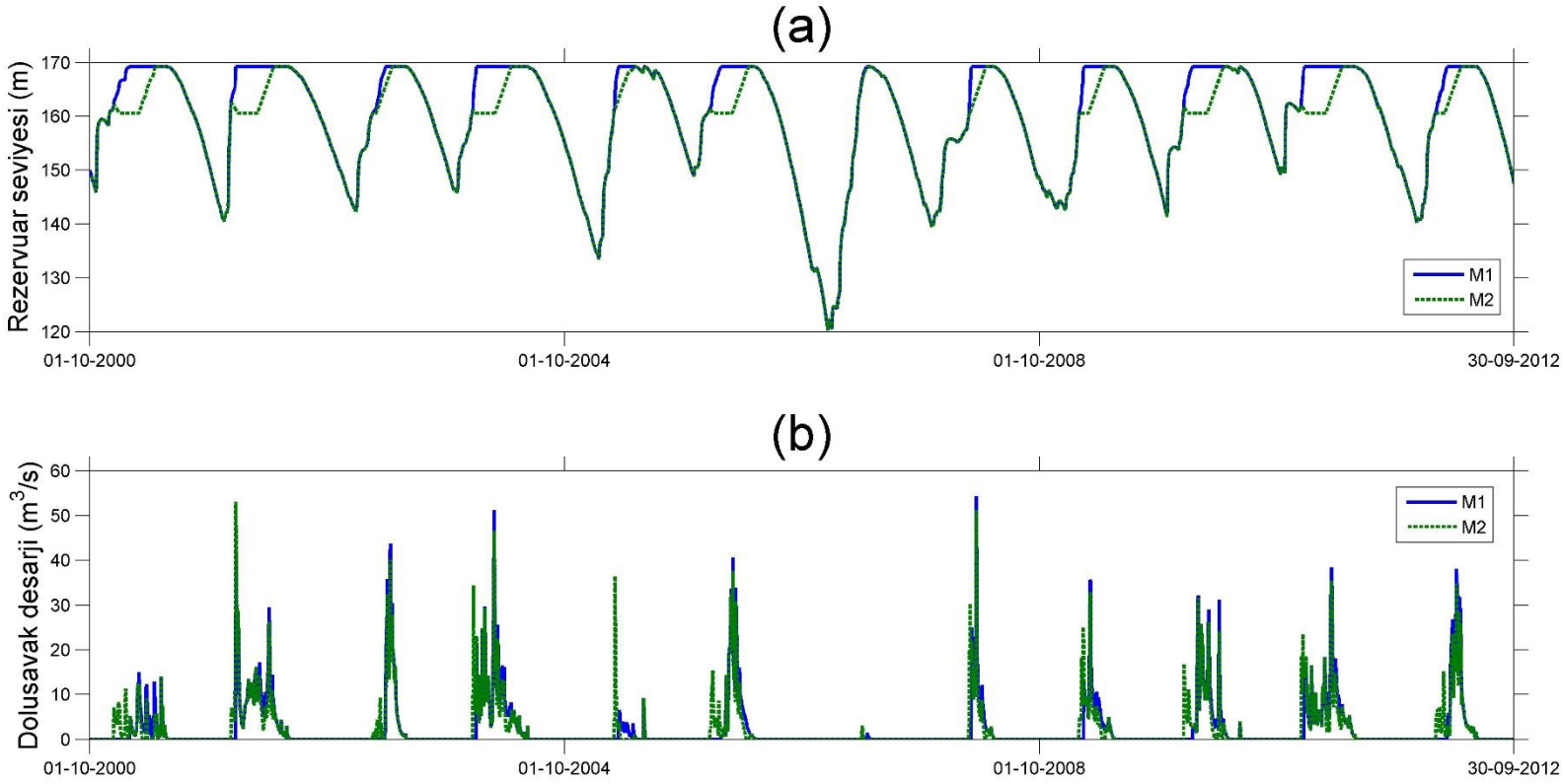
$$\min_{H,Qs \in \{0,\dots,T\}} J(H,Qs) = w_1 \sum_{k=1}^{N} (169.2 - H^k) + w_2 \sum_{k=1}^{N} (Qs^k) + w_3 \sum_{k=1}^{N} mak(Qs^k - 100,0)^2 + w_4 \sum_{k=1}^{N} mak\left(H^k - H_{RE}^k, 0\right)^2 \quad (4.8)$$

Burada, H_{RE} rehber eğri ayar noktası (m) olmak üzere, ağırlıklar (w) ise w_1=1, w_2=1, w_3=10, w_4 =10'dur k (gün): zaman aralığı ($k \in T = \{1,2,3,\dots,N = 4383\}$.

M2 modeli ile aynı veri aralığına optimizasyon tekrar uygulanarak yeni sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.10). Her iki modele ait rezervuar seviye ve dolusavak deşarjları sırasıyla M1 modeli ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10a ve 4.10b'de gösterilmiştir. Bu iyileştirme ile yeniden doldurma stratejilerinde fazladan boş depolama hacmi sağlanarak taşkın koruma için düşük risk teşkil edilecektir. Sürekli çizgi ve kesikli çizgi arasındaki alan (ya da rezervuardaki hali düşünülürse hacim), taşkın öteleme yapabilmek için sağlanan fazladan boş hacimdir.



Şekil 4.9 *Dolusavak kret kotu ve maksimum seviye arasındaki M1 modeli sonuçları analizi ve planlanan Rehber Eğri (RE)*

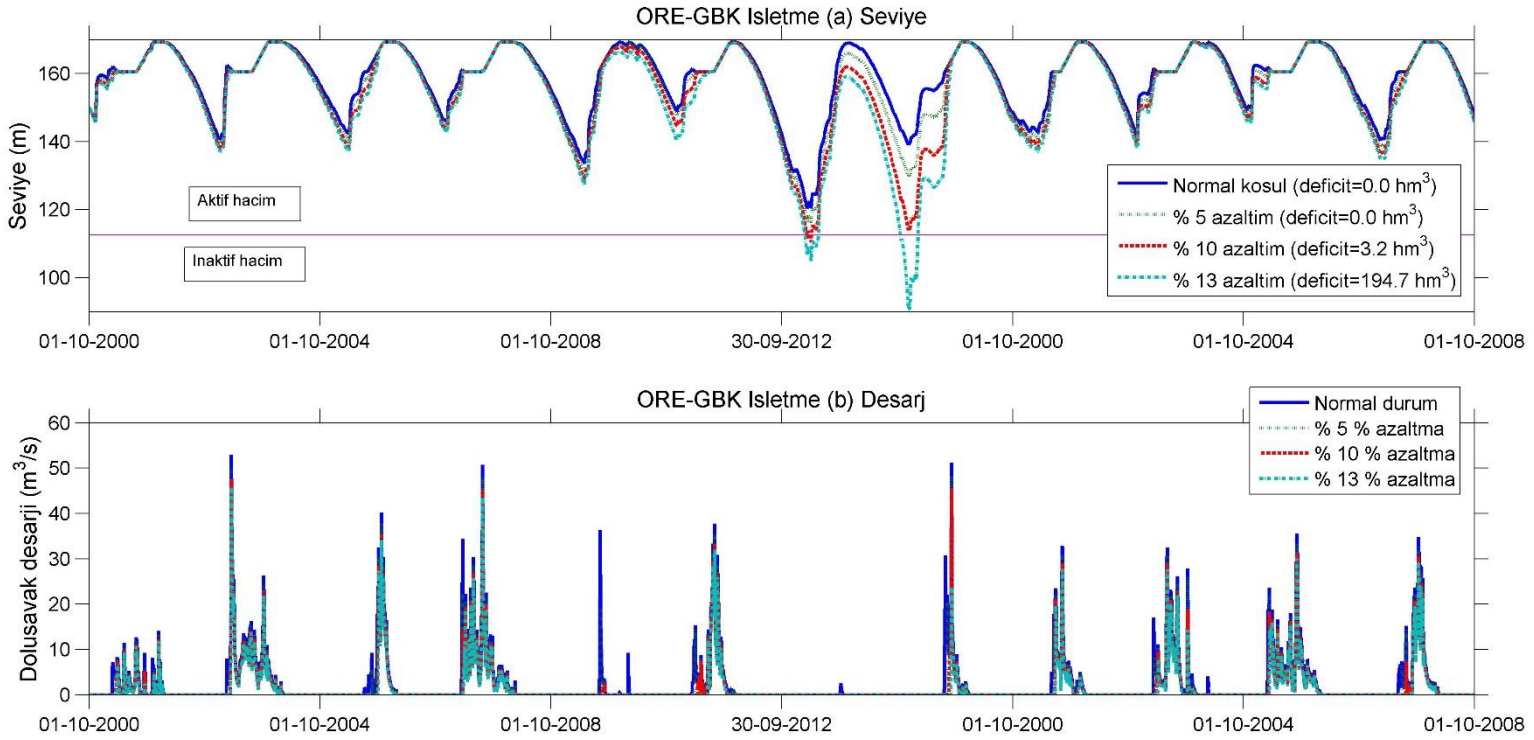


Şekil 4.10 *M1 ve M2 modellerinin karşılaştırması (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]*

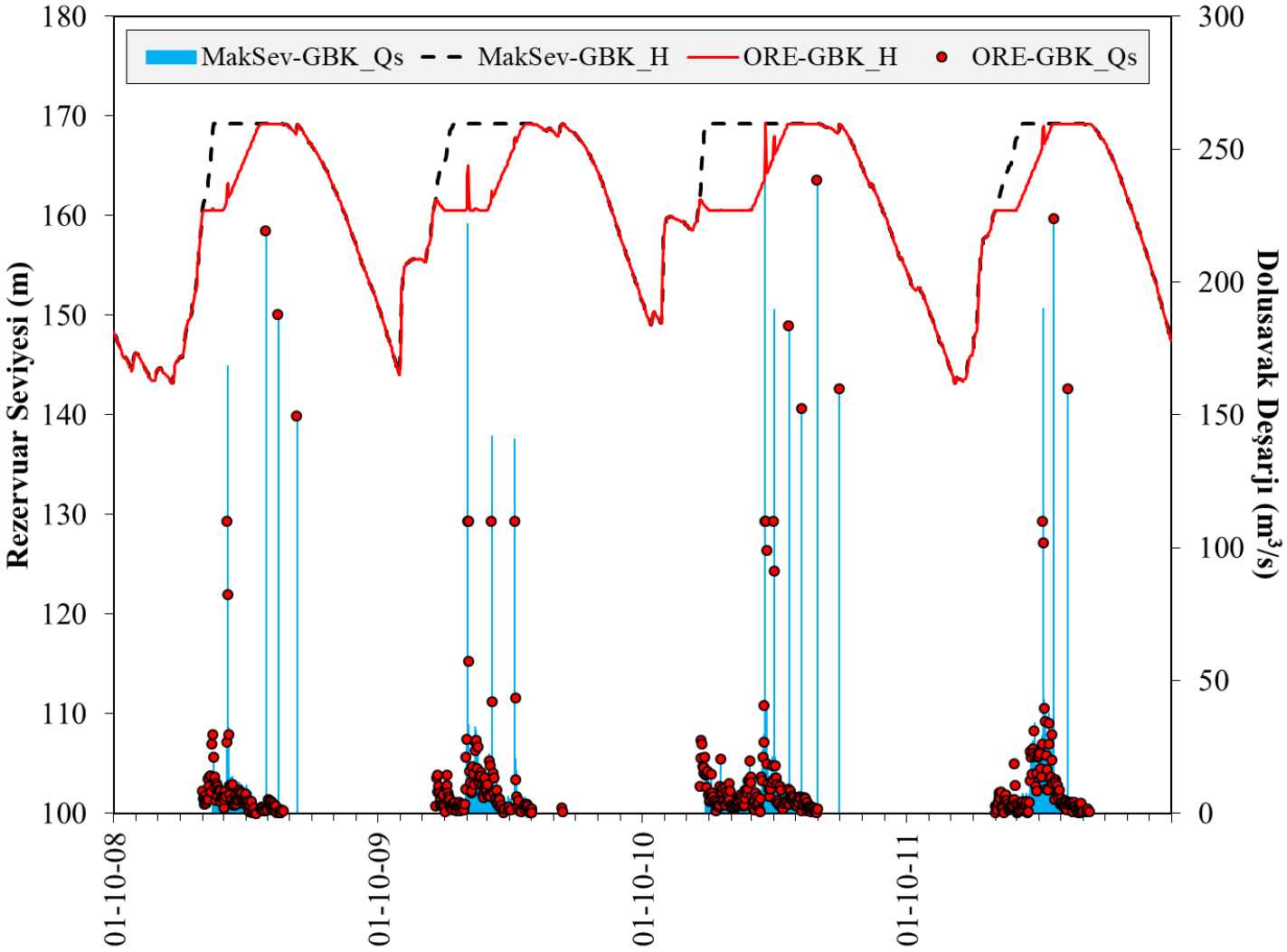
4.3.1.3. Rehber eğrinin GBK'de test edilmesi (Test-IV ve V)

Bu kısımda, ORE'nin GBK'de kullanılabilirliği sorgulanmış ve model, "Optimal Rehber Eğri (ORE) tabanlı GBK (kısaca, ORE-GBK)" olarak adlandırılmıştır. MakSev-GBK'nin su temini açısından en iyi modelleme olduğu düşünülerek, bu referans model sonuçları ile daha düşük rezervuar seviyesi öneren yeni politika arasında yapılan karşılaştırma, geliştirilen eğrilerin su temini açısından güvenilirliğini sorgulayabilir. Benzer kuraklık (Test-IV) ve taşkın senaryoları (su yetersizlikleri, su kesintileri vb.) (Test-V) kullanılarak ORE'lerin kullanılabilirliği sorgulanmıştır. Her iki işletme modelinin de (MakSev-GBK and ORE-GBK) baraja gelen akımlarda % 5 azalma olana kadar su temini açısından birebir benzer sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 4.11). ORE-GBK sonuçlarına göre baraja gelen akımlarda % 5'ten daha fazla azalma olması durumunda ise baraj seviyesinin 2006 su yılında maksimuma ulaşmasına rağmen (ayrıca bu dönemde hiç dolusavak deşarjı da olmamıştır), bir sonraki yılda su kesintileri kaçınılmaz olmaktadır. Diğer akım azaltım senaryosunda ise (% 10), MakSev-GBK modeli ile oldukça az (kabul edilebilir) farklar gözlenmiştir. % 13 azaltım senaryosunda ise ORE-GBK'nin 35.47 hm^3 daha fazla su açığına yol açtığı görülmüştür. % 10 azaltımdan sonra barajın ölü hacim altında su teminine zorlanmasından (pratikte su temini açısından bir çözüm bulunmadığından) dolayı ORE-GBK modelinde yeni bir düzenleme yapılmamasına karar verilmiştir. En önemli kriterlerden birisi de barajın her azaltım senaryosunda su kesintilerinden önce dolusavak deşarjlarını durdurarak maksimum rezervuar seviyesine ulaşmasıdır. Kurak dönemden önce barajdan herhangi bir deşarj olmadığından, bu aşamadan sonra yapılacak olası bir değişikliğin sonuçlar açısından iyileştirme yapmayacağı da öngörülebilir.

Aradaki dolusavak deşarj farkları karşılaştırıldığında ise (ORE-GBK ve MakSev-GBK), ORE işletme kurallarının referans işletmeye göre daha fazla deşarj öngördüğü tespit edilmiştir. Geç depolama nedeniyle bu durum beklenen bir durumdur. En olası sebep ise kış ve ilkbahar aylarında daha büyük taşkın koruma havuzu sağlanarak, taşkın riskinin daha fazla olduğu günler için önlem alınmasıdır. Taşkın durum senaryoları sonuçları benzer şekilde MakSev-GBK taşkın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, 16 taşkın olayının 7 tanesi ORE tarafından sağlanan taşkın koruma havuzu avantajı ile ötelenebilmiştir (Test-V, Şekil 4.12). Sonuçlara göre, sistemin depolama ya da tam dolu dönemlerde hala istenilen performansta taşkın öteleme görevi üstlenebildiği söylenemez.



Şekil 4.11 *Normal ve kuraklık durumları için ORE-GBK işletme sonuçları (Test-IV) (a) Rezervuar seviyesi [m] (b) Dolusavak deşarjı [m^3/s]*



Şekil 4.12 *MaxLev-GBK sonuçları ile karşılaştırmalı olarak taşkın koşullarında ORE-GBK işletme sonuçları (Test-V)*

ORE-GBK simulasyonuna göre, geliştirilen eğriler işletmecilere hem güvenli su temini hem de bazı dönemlerde ekstra taşkın havuzu sağlayabilmektedir. Bu sebeple, depolama esnasında gerçekleşen yüksek akım olayları daha etkili şekilde yönetilebilmektedir. Fakat, özellikle rezervuar seviyesinin neredeyse en yüksek olduğu ve taşkın koruma havuzunun bulunmadığı 2009, 2011 ve 2012 olayları için işletme stratejileri hala geliştirmeye açık durmaktadır. Bu nedenle, başka yöntemlerin arayışına girilmesi ya da kısa dönem kararlarında öncül deşarj ve tahmin stratejileri ile yönetilmeleri gereklidir. Yukarıda açıklandığı ve çeşitli testlerle gösterildiği üzere, depolama zamanını etkili şekilde ve yaz aylarında su kesintisi yapmayacak şekilde öteleyecek bir çözüm bulunmadığından rezervuarın tam dolumu kaçınılmaz olmaktadır. Bu noktada, gerçek zamanlı bir işletme stratejiyle olay daha başlamadan öncül deşarjlar yapılarak ve aynı zamanda uzun dönem su sağlama hedeflerini de korunarak bir radyal kapak işletmesi sağlanabilir. Bu yöntem ise kapalı-döngü kurulum olarak adlandırılmaktadır. Sonraki bölümlerde de kapalı-döngü kurulumu ve bu kurulum esnasında karşılaşılacak 3 sorudan bahsedilmektedir:

- Değişken rehber eğri ile entegre bir öncül strateji geliştirilebilir mi ?
- Taşkınları güvenli bir şekilde azaltmak için bu döngüdeki tahmin ufku (lead time) ne olmalıdır ?
- Baraj giriş akım tahminlerinin kapalı-döngü modeldeki rolü nedir ?

4.3.1.4. Kapalı döngü model kurulumu (gerçek zamanlı uygulama, Test-VI)

Uzun süreli veriler ile yapılan optimizasyon çalışmaları, ortalama bir strateji vermektedir. ORE gerçek zamanlı kullanımında (günlük ve saatlik) ani değişen giriş akımları (taşkın gibi) için pratik ve esnek bir yönetim sergilememektedir. Bu gibi durumlarda, başlangıç ve bitiş seviye hedefleri ORE'ye bağlı olan öncül deşarjlı rezervuar seviyesi işletmesinin yapılması gerekebilmektedir.

Kapalı-döngü modelleme, gerçek zamanlı (kısa dönem) bir işletmeyi taklit ettiği için tahmin belirsizliğinin kararlara etkisinin değerlendirilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu kısımda, MÖK ile rezervuarın özellikle tam dolu olduğu durumlarda kullanılabilecek strateji, kapalı-döngü sistem ile geliştirilmiştir. Bu sistemler, hindcast adı verilen geçmişe dönük tahmin çalışmaları olarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik bir sistemin gerçek zamanlı uygulama benzetimi taklit edilerek geçmiş dönem verileri ile bir model analizi yapılır. Bu kurulum şu süreçlerden meydana gelmektedir:

i. Öncelikle, bir hindcast periyodu seçilir. Sonrasında (karar anında ileriye dönük ne kadar süre için optimizasyon yapılacağını belirten) tahmin ufku ve (optimizasyonun hangi zaman aralıkları ile tekrarlanacağını belirten) azalan ufuk belirlenir. Bu çalışmada tahmin ufku açık-döngü optimizasyon karşılaştırmaları ile belirlenirken, azalan ufuk en kısa günlük zaman dilimi olan 1 gün olarak seçilmiştir. Detaylar için Bknz. Bölüm 3.1.2.

ii. Bilgisayar sisteminde hazırlanan kodlar çalıştırılarak hindcast periyodu başlangıcından itibaren her azalan ufukta ardışık iki hesaplama yapılır. Birinci hesaplamada, verilen bir başlangıç koşulunda; MÖK bütünleşik optimizasyon ve simülasyonu birlikte kullanarak akım tahmin verisi ile tanımlanmış tahmin ufku için ileriye dönük optimizasyon yapar. Optimizasyon sonucu uygulanacak tavsiye (optimal) deşarj belirlenir. İkinci hesaplamada, hindcast modelde süreç bir adım ilerlenir ve sadece simulasyon modeli kullanılarak bir adım önce önerilen deşarj akımlar (kurallı bir GBK gibi düşünülebilir) ve baraja giren gerçek akımlar ile simüle edilerek gerçek rezervuar seviyesi bulunur ve kayıt edilir.

iii. Eğer baraj seviyesi maksimumda ve tavsiye edilen deşarj yetersiz ise simülasyon aşamasında optimalden yüksek deşarj gerçekleştirilebilir.

iv. Elde edilen rezervuar seviyesi bir sonraki MÖK'nin başlangıç seviyesini oluşturur.

v. Bu hesaplamalar tüm hindcast periyodu için her zaman aralığında (azalan ufuk) ilerlemeli olarak yapılarak deneme sonlandırılır.

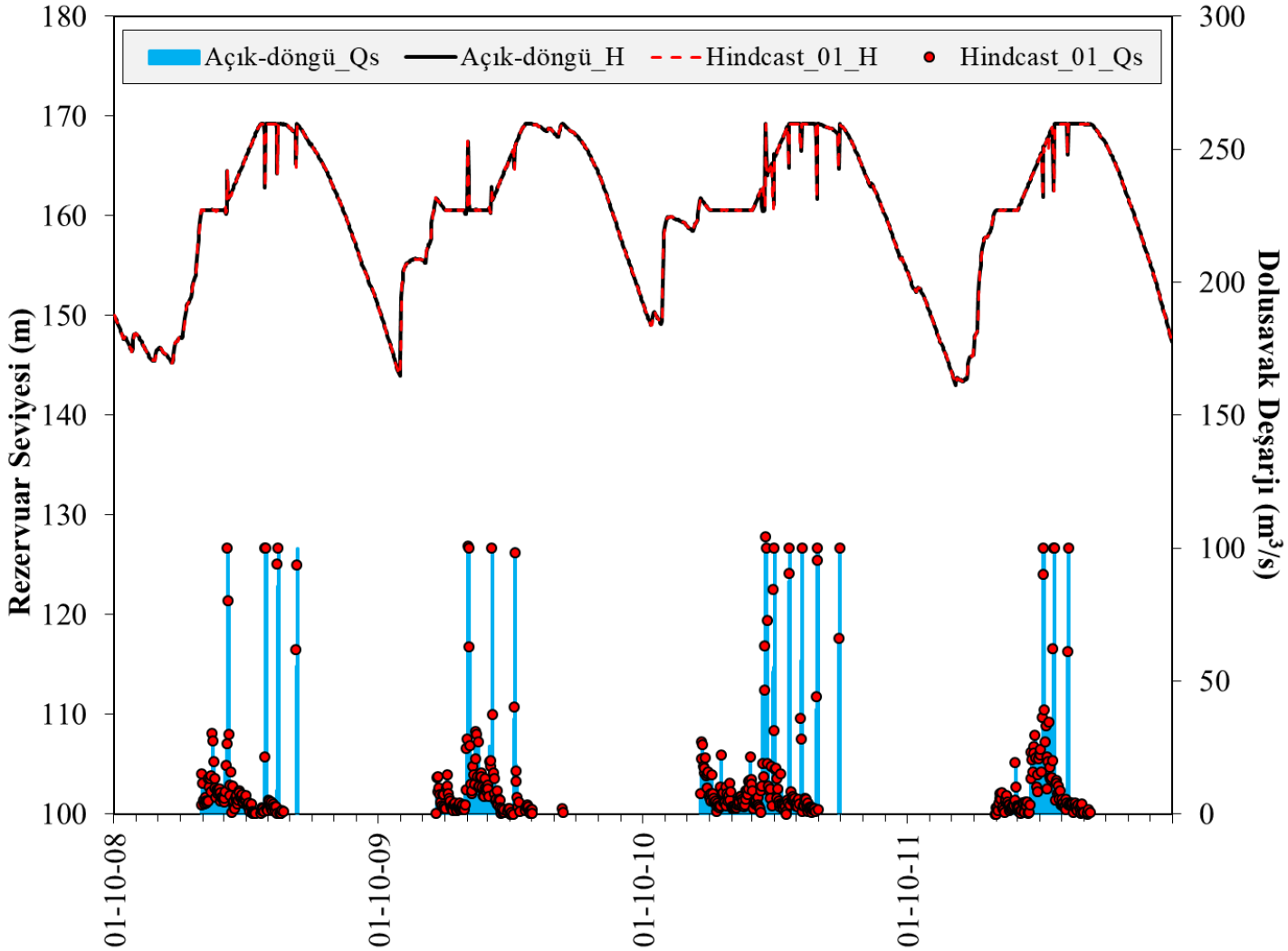
vi. Son olarak, kayıt edilen gerçek deşarj ve rezervuar seviyeleri çizdirilirek değerlendirilir.

İlk aşamada baraj giriş akım tahminleri doğrudan gözlem değerlerinden (Q_{100} taşkın senaryosunda elde edilen günlük pik değerler) girdi yapılarak hatasız (mükemmel) tahmin olarak sağlanmıştır. Bu ise tahmin ufku (forecast horizon) performansının belirlenmesi ve en iyi durumda dahi barajın kaç saatlik bir tahmin verisine (yani tahmin ufkuna) ihtiyacı olduğunun tespit edilmesini sağlar. Bu süreç her bir adımda (günlük modelde azalan ufuk bir gün seçilmiştir) bütün süreç (hindcast periyodu) tamamlananana kadar devam edilmektedir.

Başlangıç denemesi olarak, yukarıda bahsediliği şekilde uygun bir tahmin ufku arayışına girilmiştir. Burada, taşkın koşulunda açık-döngü (k [gün]: zaman aralığı [$k \in$

$T = \{1,2,3, \dots, N = 1461\}$]) ve kapalı-döngü model (k [gün]: zaman aralığı [$k \in T = \{1, \dots, N = 2\}$]) sonuçlarının benzer olduğu tahmin ufkuna varılana kadar çeşitli denemeler yapılmıştır. Açık-döngü model, olayı bütün ufukta gördüğü düşünüldüğünde, olası en iyi sonuç olarak kabul edilmektedir. Bu açıdan bu test kapalı-döngüde mükemmel tahminlerle karar alıp, mükemmel tahminlerle işletme yapmaya yöneliktir.

Sonuçlara göre, tüm taşkın olayları, geliştirilmiş öncül metot ile güvenli bir şekilde ve su temini hedeflerini aşmayacak şekilde yönetilebilmiştir (Hindcast_01) (Şekil 4.13). En yüksek performansı veren sonuca göre seçilmiş olan tahmin ufku ise 2 gün olarak belirlenmiştir. 2 günden daha fazla tahmin ufkuna sahip modellerin açık döngü ile benzer sonuçları verdiği gözlenmiştir. Bu durumda, 2 günden daha uzun tahmin kullanılması modelde işletme kararları açısından bir değişiklik yaratmayacaktır, öte yandan daha az tahmin ufkunda ise taşkın yönetimi açısından güvenli bir işletmenin mümkün olması garanti edilemez.



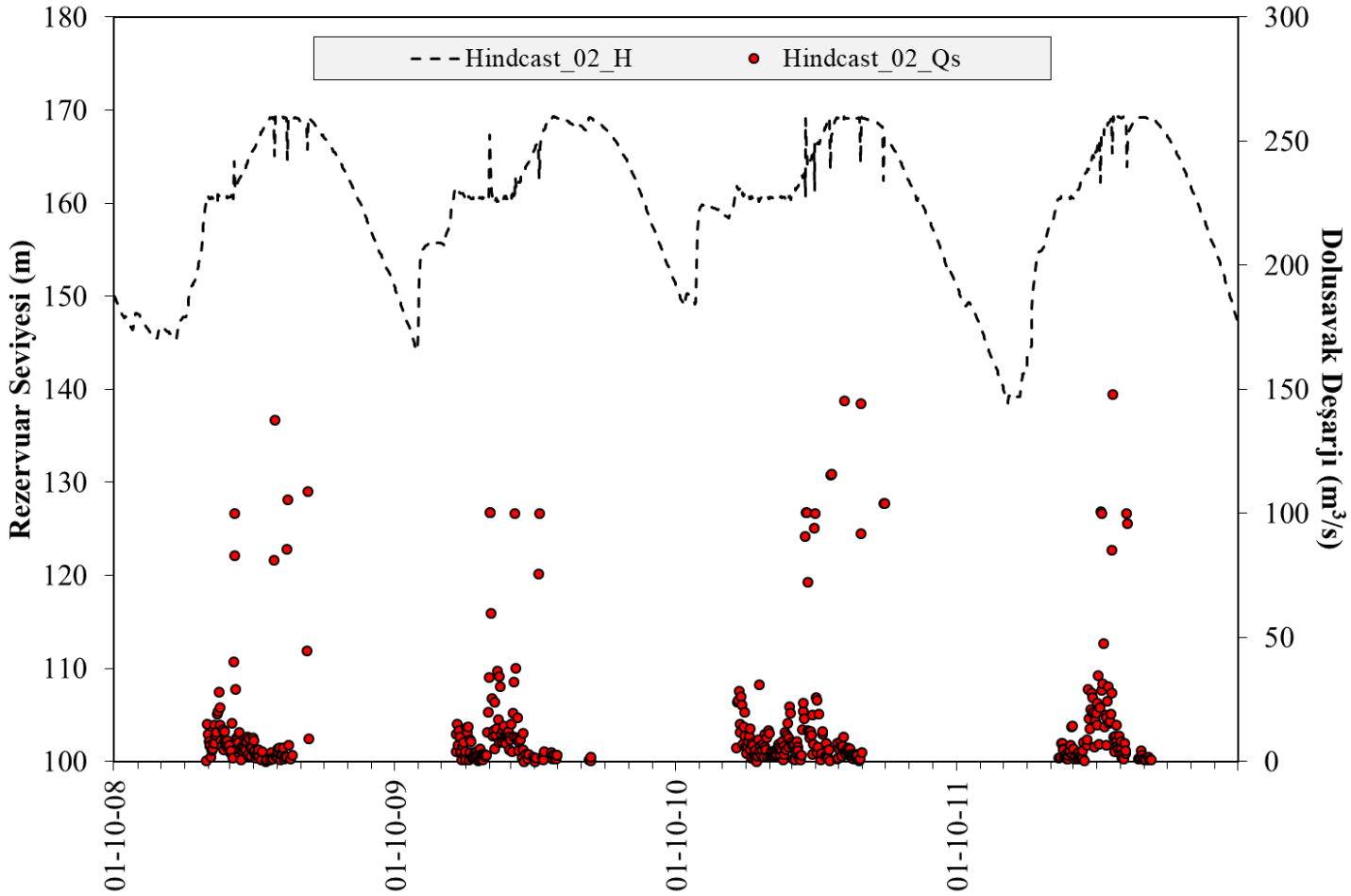
Şekil 4.13 *Hindcast_01 testi açık ve hindcast performası karşılaştırması*

4.3.1.5. Kapalı döngü model tahmin değeri testi (Test-VI)

Yukarıda bahsedilen model sonuçları mükemmel tahmin durumunda geçerlidir. Fakat, hiçbir tahmin mükemmel olamayacağından kısa dönem taşkın yönetiminin tahmin belirsizliğinde de içermesi gerekmektedir. Bu açıdan, geliştirilen model ancak 2 günlük hatasız (mükemmel) akım tahminlerine sahip olunması durumunda geçerlidir. Fakat, pratikte sayısal hava tahmin verileri (deterministik ya da olasılıklı) genellikle büyük belirsizlikler (uncertainty) içermekle birlikte bu durum (görece) daha küçük havzalarda daha da ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, bu belirsizliklere bir de veri, hidrolojik model vs. belirsizlikler de eklendiğinde, tahmin belirsizliğinin tamamen ortadan kaldırılmasının imkansızlığı ön plana çıkmaktadır. MÖK deterministik bir metot olmakla birlikte, yağış olayının fazla ya da düşük tahmin ediliği durumlarda yanlış karar alma (erken deşarj, geç deşarj) gibi durumlara yol açabilmektedir (Raso ve diğ., 2014). Bu açıdan, daha iyi bir karar destek sisteminin geliştirilebilmesi de tahmin belirsizliğinin değerlendirilebilmesi ile mümkündür.

Hatalı akım tahminleri ile sistem değerlendirmesi yapmak için, pertürbe edilmiş taşkın olayı, tekil zaman serisi DAT (Bkz. Bölüm 3.2.1, Şekil 4.5), MÖK modelinde kullanılmıştır (Test Hindcast_02). Buna göre, Hindcast_02 modeli pertürbe edilmiş akımlar ile dolusavaktan bırakılacak olan deşarja karar verirken; barajın durum değişkenleri (seviyesi) bu tavsiye deşarjın yanısıra bir sonraki gün gerçekleşen yağış ve akımlara göre güncellenir. Bu sayede, gerçek zamanlı bir işletmeyi taklit eden sonuçlar elde edilir. Buradan elde edilen sonuçlara göre (Şekil 4.14) 16 olaydan 4 tanesinde beklenenden daha az bir akım tahmini yapıldığından, optimize edilen ve öngörülen öncül deşarjlar olması gerekenden düşük hesaplanmakta ve bu da sonrasında simülasyon kısmında mansap kanalı limitlerini aşacak deşarj kararlarının alınmasına yola açmaktadır. Öte yandan, % 30 hata bandında diğer tahmini taşkın olayları için elde edilen sonuçlar hem taşkın hem de su temini için kabul edilebilir seviyededir ve sistemin uygulanabilirliğini göstermektedir.

Bu durumda olası çözüm, sadece hatalı tahminler ile sistemi test etmek değil, tahmin belirsizliğinin de optimizasyon algoritmasına dahil olduğu stokastik optimizasyondur. Fakat, 2 günlük bir tahmin ufku için olasılıklı tahminlerde (üyeler arası) saçılma çok düşük olacağından, bu çalışma alanı için saatlik bir model uygulamasına geçilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.14 *Hindcast_02 için MÖK sonuçları (pertürbe edilmiş taşkın akımları ile)*

4.3.2. Saatlik işletme model kurulumu

Önceki bölümlerde yapılan analizler, kısa dönemli bir baraj işletmesinde taşkın durumu için günlük modellerin yetersiz olduğunu ve saatlik modele geçilmesi gerekliliğini ön plana çıkarmıştır. Bu açıdan optimizasyon modeli amaç fonksiyonu Denklem (4.9), günlük yerine saatlik girdi verileri alan M2 modelinin optimizasyon amaç fonsiyonunda fazladan bir terim içermesiyle oluşturulmuştur. Bu terim ise saatlik ardışık dolusavak deşarjlarını kısıtlayarak mekanik açıdan daha uygulanabilir bir model ortaya koyar.

$$\min_{H,Qs \in \{0,\dots,T\}} J(H,Qs) = w_1 \sum_{k=1}^{N}(169.2 - H^k) + w_2 \sum_{k=1}^{N}(Qs^k) + w_3 \sum_{k=1}^{N} mak(Qs^k - 200,0)^2 + w_4 \sum_{k=1}^{N} mak\left(H^k - H_{RE}^k, 0\right)^2 + w_5 \sum_{k=1}^{n} mak(Qs^{k+1} - Qs^k)^2 \quad (4.9)$$

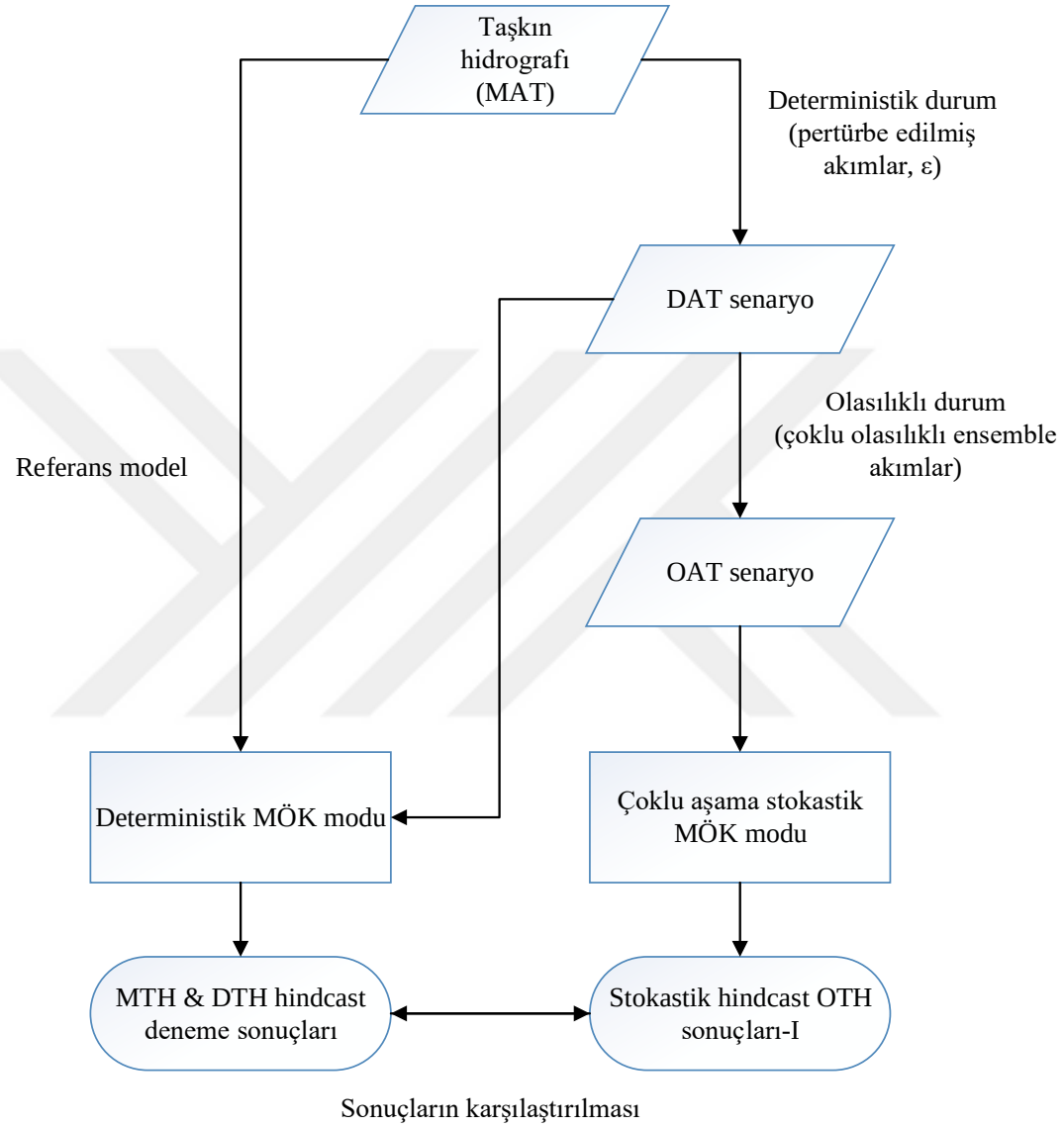
Burada; diğer değişken ve katsayılar yukarıda açıklanmış olmakla birlikte w_5=0.0001 alınmıştır. k (gün): zaman aralığı ($k \in T = \{1,2,3,\dots,N\}$. N bu kısımda tahmin ufkuna bağlıdır. Azalan ufuk tüm bölüm (4.3.2) için 1 saat olduğundan tahmin ufku 12 saat için $N = 12$, 24 saat için $N = 24$.

Bu kısımda yapılan denemeler Şekil 4.15'te sunulmuştur. Saatlik hindcast (azalma ufku = 1 saat) denemeleri üç ana alt başlıktadır:

A. Mükemmel Tahmin Hindcast (MTH) Testleri: Mevcut veriler içerisinde (geçmiş dönemde) saatlik taşkın giriş akımı gözlenmediğinden, 100 yıllık tekerrürlü taşkın hidrografı (Q_{100}) girdi olarak kabul edilmiş (MAT) ve deterministik MÖK'de test edilmiştir. Bu giriş akımları gözlenmiş veriler (ya da mükemmel tahmin) olarak kabul edilmiştir. MTH testleri hem tahmin hem de simulasyon aşamasında geleceğe ait tüm bilgiyi hatasız olarak içerdiğinden, (mevcut sistem tasarımı yeterli kabul edildiğinde) en iyi sonuç olarak düşünülmüş ve referans olarak kullanılmıştır.

B. Deterministik Tahmin Hindcast (DTH) Testleri: Tekil deterministik tahminlerin (DAT) MÖK'de hindcastlerini ve sonuçlarını içermektedir. Günlük modele benzer şekilde mükemmel tahminden pertürbe edilmiş akımlar kullanılmıştır. Farklı olarak ise verilen tahmin ufku için her bir zaman aralığında tekrar üretilerek MÖK'de çalıştırılmıştır.

C. Olasılıklı Tahmin Hindcast (OTH) Testleri: MÖK'de tahmin belirsizliğinin dahil edilmesi için çoklu üyeye sahip OAT'lerin Çoklu-Aşama Ağaç Tabanlı MÖK'de hindcast testlerini içerir.

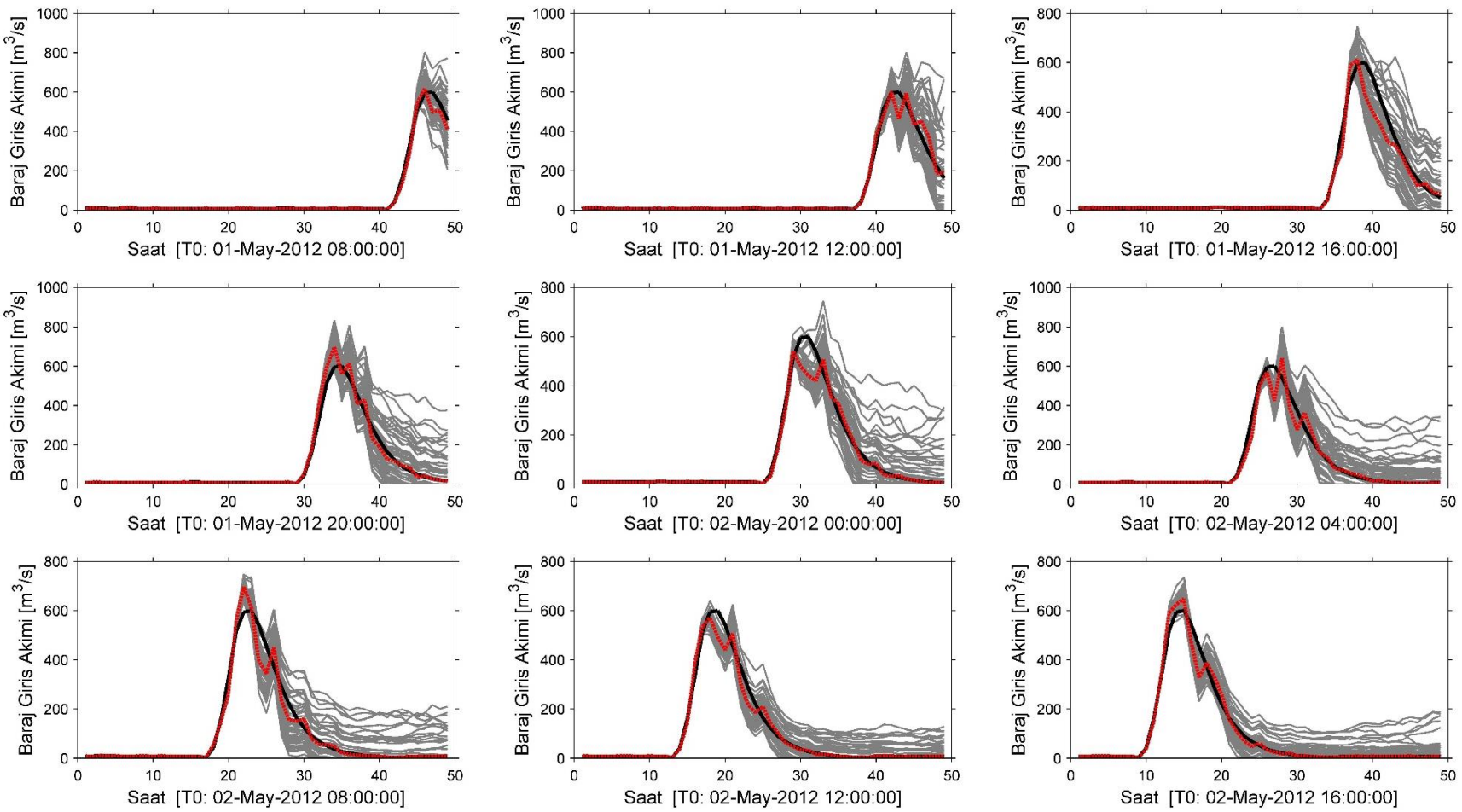


Şekil 4.15 *Saatlik model hiyerarşisi*

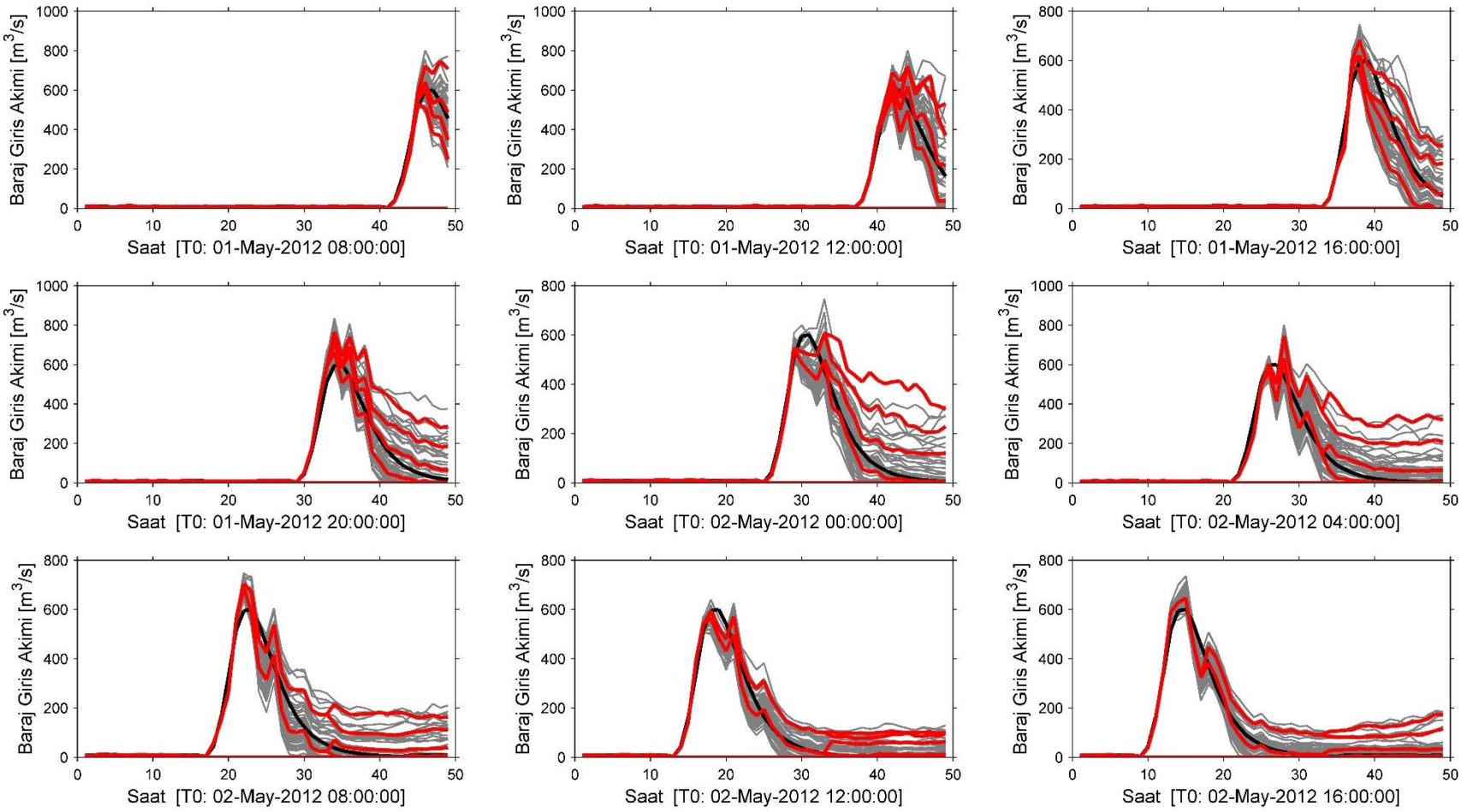
Modellerde kullanılan girdi akım verileri (MAT, DAT, OAT) dörder saat aralıklarla değişen [T0] anlarda gösterimi Şekil 4.16'da sunulmuştur. Şekilde; siyah düz çizgiler mükemmel tahminleri, kırmızı kesikli çizgiler DAT'yi, gri düz çizgiler ise OAT'yi temsil etmektedir. OAT'lerin gelişim süreci çok kritiktir; OAT'ler hem belirsizliği içerecek şekilde saçılmalı hem de bu saçılma anlamlı olacak derecede de fiziksel duruma uygun

olmalıdır. Geliştirilen algoritma sayesinde OAT'ler artan belirsizliğe sahiptir. Bu belirsizlik düşük akımların gözlendiği zamanlarda ise kısıtlanmıştır.

Üretilen bu OAT'ler stokastik optimizasyonda kullanılmadan önce ağaç tabanlı algoritma (Bknz. Bölüm 3.3.3) ile azaltılmaktadır. Bu azaltma iki açıdan fayda sağlar. Birinci olarak; girdi ve çıktı sayısını azaltarak optimizasyon problem boyutunu düşürür. İkinci olarak; bir filtreleme yaparak girdilerdeki gereksiz bilgilerin (örneğin birbirine çok yakın olan tahminleri tek bir ağaç ile temsil ederek) elenmesi sağlar. Bu sayede kullanılacak girdiler optimizasyon sonuçları açısından daha anlamlı hale gelir. Burada, Şekil 4.16'da sunulan OAT'lerin aynı [T0] anlarındaki azaltılmış hallerinin gösterimi Şekil 4.17'de sunulmuştur. Bu örnekte, 50 OAT üye her seferinde toplamda 4 dal sayısı ağaç yapısına çevrilmiştir. Dal sayısı seçimi OAT'lerdeki belirsizliğin hangi çözünürlükte alınacağını belirler. Tek bir dal seçimi OAT ortalaması olarak düşünülürken dal sayısının adım adım artırılması durumunda orijinal OAT'lerdeki yapıyı daha fazla temsil eden ve artan üye sayısını ifade eder. Bu konudaki detaylı inceleme ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.



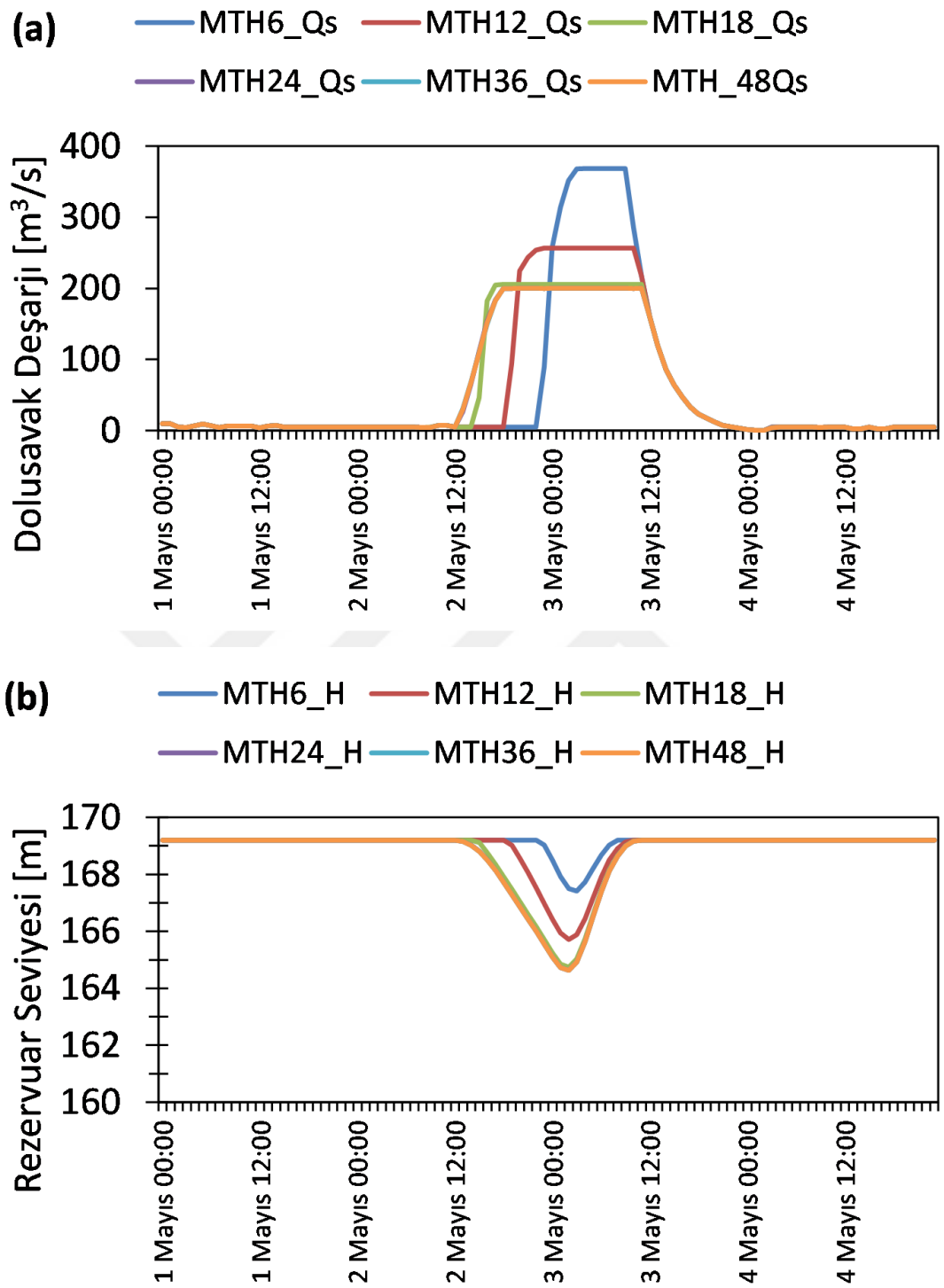
Şekil 4.16 *Kontrol modeli girdisi (Senaryo-01) saatlik akım tahminleri (MAT: siyah düz çizgi, DAT:kırmızı kesikli çizgi, OAT:gri düz çizgiler)*



Şekil 4.17 *Kontrol modeli girdisi (Senaryo-01) saatlik akım tahminleri (MAT: siyah çizgi, OAT:gri çizgiler, ağaç tabanlı azaltılmış OAT: kırmızı çizgiler)*

4.3.2.1. Mükemmel tahmin hindcast (MTH) testleri

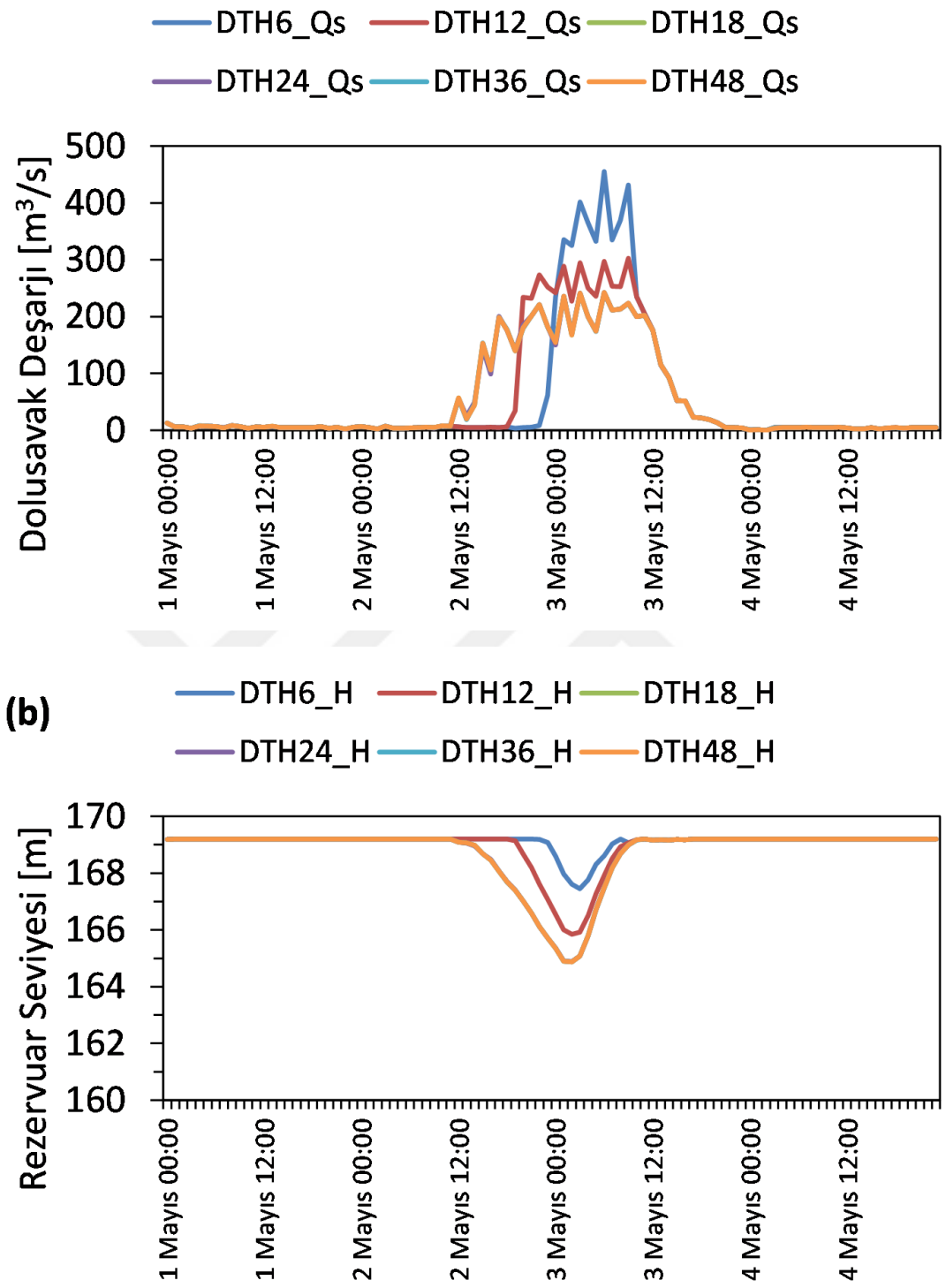
Kapalı döngü bir kontrol sisteminde yeterince uzun tahmin ufku seçilirse yaklaşık olarak gerçek sonsuz ufuk çözümüne ulaşıldığı kabul edilebilir (Jørgensen, 2005). Bu amaçla, en uygun tahmin ufku seçilimi yapılmak istenmiş ve 6, 12, 18, 24, 36, 48 saat olmak üzere farklı tahmin ufku testleri yapılmıştır. Mükemmel tahmin verisi girdisi ile yapılan hindcast test sonuçlarına ait dolusavak deşarjları ve rezervuar seviyeleri Şekil 4.18'de sunulmuştur. Düşük tahmin ufkundan yüksek tahmin ufkuna geçildikçe dolusavak deşarj kararları da daha erken zamana çekilmekte ve deşarj miktarlarında azalma olmaktadır. Örneğin, baraj giriş akımları mükemmel tahmin edilseydi 6 saat ileriyi öngören bir MÖK dolusavak deşarjları açısından (350 m^3/s'leri aşan deşarjlar ile) yetersiz kalacaktır (Şekil 4.18a). Sonuçlara göre; 18. saate kadar dolusavak deşajlarında azalma olmaktadır. Tahmin ufku daha fazla arttırılırsa (24, 36, 48 saat gibi) model en iyi çözüme ulaştığından (200 m^3/s dolusavak deşarjı ve olay sonunda başlangıç seviyesine güvenle geri dönebilme), hindcast performansları benzer sonuçları sergilemektedir. Bu bakımdan, güvenilir bir işletme için en az 24 saatlik bir tahmin ufku gerektiği söylenebilir.



Şekil 4.18 *MT ile hindcast testleri (MTH) tahmin ufku performanslarının karşılaştırılması a) Dolusavak deşarjı [m^3/s] b) Rezervuar seviyesi [m]*

4.3.2.2. Deterministik tahmin hindcast (DTH) testleri

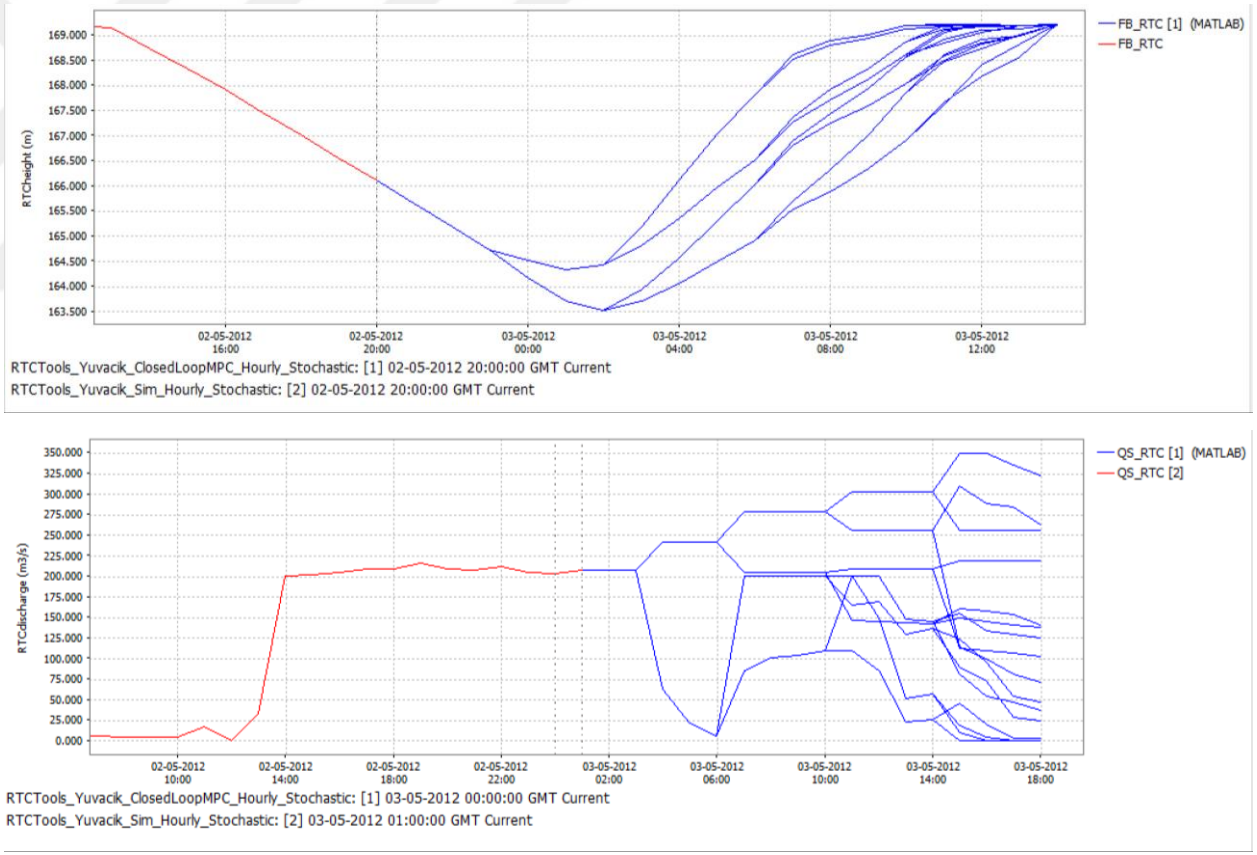
Bu aşamada, hindcast testleri DAT'leri kullanarak bir deşarj öngörürken, sonrasında rezervuar seviyesi gerçek akımlara (mükemmel tahminlere) göre güncellenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.19'da sunulmuştur. Günlük modelde bir eksiklik olarak ön plana çıkan zorlayıcı koşullarda saatlik işletme çalışması yapılmıştır. Bu ise, rezervuarın tam dolu olduğu durumda taşkın hidrografının hatalı (fazla ya da az) tahmin edilmesi durumudur. Bu temsiliyet için pertürbe edilmiş akımlar kullanılmıştır. Günlük modelden farklı olarak tek bir zaman serisi yerine, DAT akımlar her bir azalan ufukta belirli tahmin ufku için birbirlerinden bağımsız olarak tekrar oluşturulmuştur. Sonuçlar, tahmin ufku açısından MTH testlerini benzer olmakla beraber (uzun tahmin ufkunda daha erken dolusavak deşarjları), hatalı girdi verilerinden ve güncellemelerden ötürü deşarjlarda iniş çıkışlar görülmektedir. Öte yandan, tahmin ufku ne kadar uzatılırsa uzatılsın, dolusavak deşarjlarını maksimum limit altına düşürmek mümkün değildir. Bunun en temel sebebi, olması gerekenden az tahmin edilen akım verileridir. Sistem tekil bir *disturbanc*e'a bağlı olduğundan MTH ile benzer rezervuar seviyesi fakat dolusavak deşarjları açısından istenmeyen sonuçlar vermektedir. Bu aşamada, olası çözüm bir sonraki bölümde tahmin belirsizliğinin dahil edildiği model testlerinde aranmıştır.



Şekil 4.19 *DAT ile hindcast denemeleri tahmin ufku performansının karşılaştırılması (Senaryo-01) (a) Dolusavak deşarjı [m³/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]*

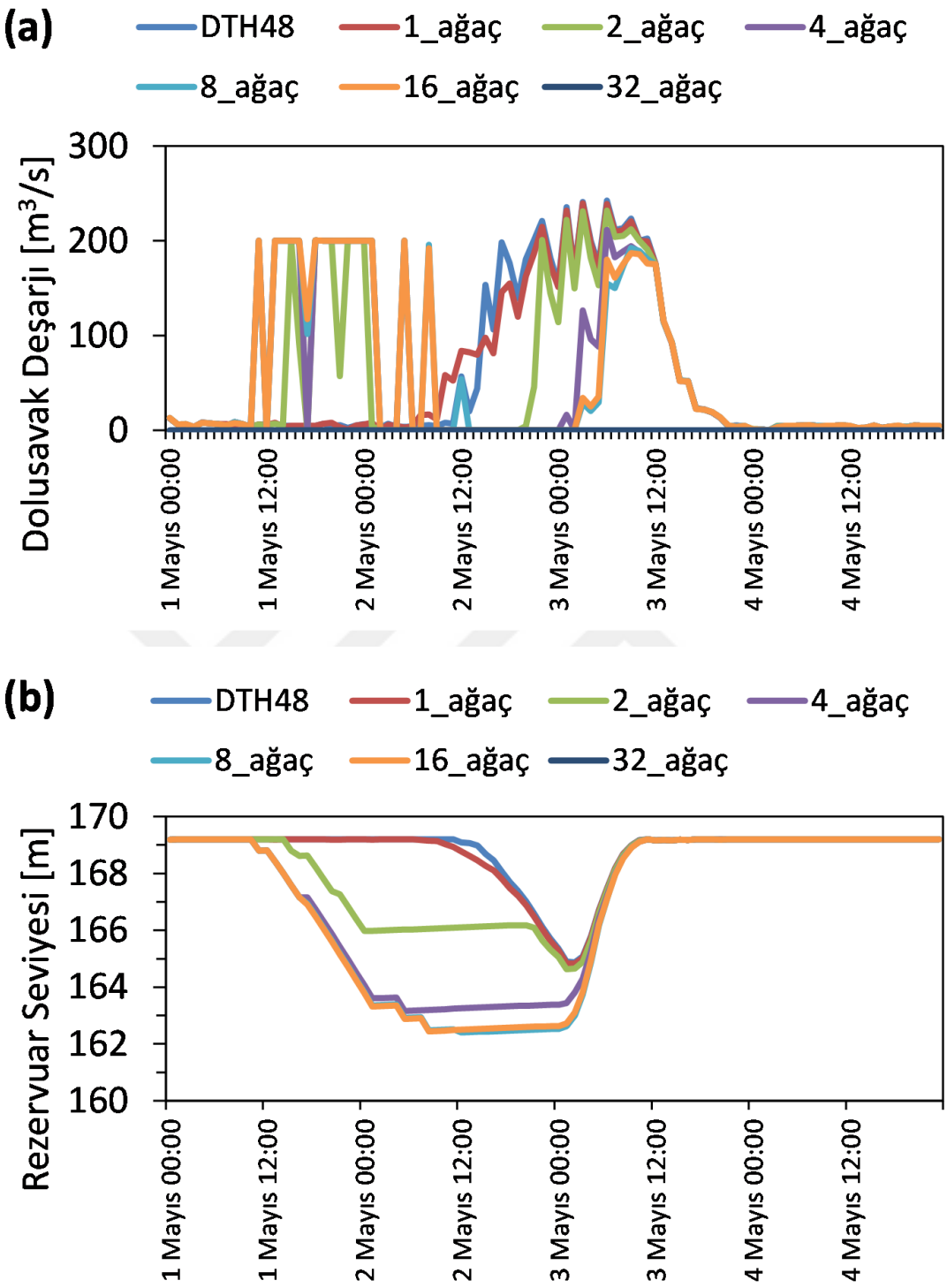
4.3.2.3. Olasılıklı tahmin hindcast (OTH) testleri

OAT'ler çoklu üye yapıları ile geleceğe ait belirsizliği temsil etme imkanı verirler. Bu kısımda, OAT girdili çoklu-aşama stokastik optimizasyon hindcast testleri yapılmıştır. Stokastik MÖK'de kontrol değişkeninin tanımlanması problemin çözümü açısından önem arz eder. Bu noktada senaryo ile azaltma uygulamak ve bunu optimizasyona entegre etmek önemlidir. Çalışmada, kütle-korunumlu ağaç azaltma tekniği kullanılarak hem girdiler azlatılmış hem de kontrol değişkeni olan dolusavak deşarjları ve rezervuar seviyesi ağaç tabanlı olacak şekilde elde edilmiştir. Bu optimizasyon, her bir zaman aralığında (bir saatlik azalan ufukta) yapılarak ilerisi için belirsizlik içeren çıktılar elde edilmiş, uygulamada (hindcast testi) ise sadece ilk saate ait deşarjlar simulasyona tavsiye deşarj olarak sağlanmıştır. Ağaç tabanlı metotta ilk zaman aralığında tek bir ağaç üyesi mevcut olduğundan uygulama açısından önerilecek deşarj tek değerlidir ve pratikte sorun teşkil etmemektedir. Şurası unutulmamalıdır ki, bu ilk deşarj ileride olası hatalı birçok girdi belirsizliğini en iyi şekilde sağlayan ilk değerdir ve deterministik kurulumdan farklı bir işlem geçmişine ve öngörüye sahiptir. Hindcast periyodunda gerçekleştirilen optimizasyona ait örnek bir çıktı hem rezervuar seviyesi hem de dolusavak deşarjları olmak üzere Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.20 *Stokastik optimizasyonda rassal bir tahmin anında ağaç tabanlı rezervuar seviyesi ve dolusavak deşarjları örneği*

Ağaç tabanlı metodolojide azaltılacak dal sayısı (x, üye sayısı) 2, 4, 6, 8, 16 gibi 2^x olmak üzere kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bunu belirlemek için geliştirilmiş bir yaklaşım bulunmamakla birlikte, karşılaştırma yapan bir çalışma da literatürde bulunmamaktadır. Üye sayısının azaltılması problem boyutlarını azaltarak işlem zamanı açısından hız kazandırmaktadır. Ayrıca, OAT'lerdeki bilginin üzerinde bir çeşit filtreleme yaparak sadece gerekli olan çözünürlüktekilerin optimizasyona katılmasında rol oynar. Fakat azaltılan üye sayısı belirsizliği kapsayacak şekilde yeterli sayıdan düşük olmamalıdır. Farklı ağaç dalı seçimi ve deterministik (DTH48) sonuçların karşılaştırıldığı bir hindcast testi Şekil 4.21'de sunulmuştur. Bu test için azalan ufuk 1 saat, tahmin ufku 48 saattir. Çeşitli denemeler yapılarak 50 adet sentetik üye OAT'nin 16 ağaç üyesine düşürülerek işlem yapılmasına karar verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ağaç dalı sayısı azaldıkça sonuçlar DTH sonuçlarına benzemektedir. Bunun iki temel sebebi vardır. Birincisi, girdi yapısı ile alakalı olarak OAT'nin DAT'den üretilmesidir. Optimizasyon açısından ise, ağaç dalı sayısının azalması OAT'deki tahmin belirsizliği bilgisinin de yok olması anlamına geldiğinden, optimizasyon sonuçlarının ortalama sonuçlara yaklaşmasıdır.

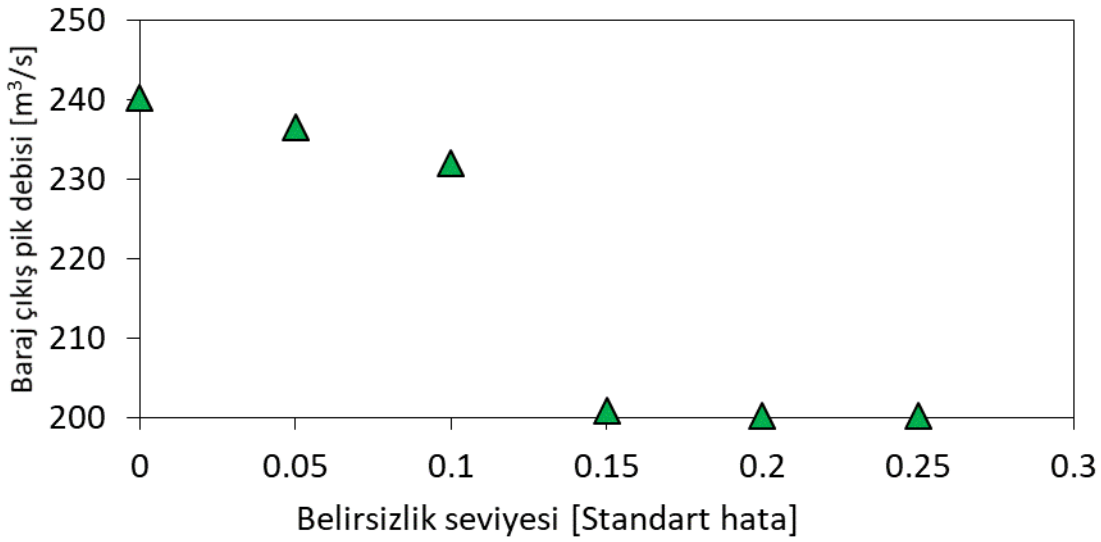


Şekil 4.21 *OTH ağaç dalı seçimi için DTH ve çeşitli farklı ağaç dalı sayısına sahip OTH'nin karşılaştırmalı gösterimi (a) Dolusavak deşarjı [m³/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]*

Öte yandan OAT'lerin üretilirken ne kadar belirsizliğe sahip olması gerektiği ise öncesinden bilinmemektedir. Bu amaçla, aynı ebeveyn DAT'ler için farklı belirsizlikler tanımlanarak ($\sigma^2 = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20\ ve\ 0.25$) farklı OAT senayoları üretilmiş ve

çoklu-aşama stokastik modelde test edilmiştir. Sonuçları özetlemek için baraj çıkışındaki pik debilerin belirsizlik senaryolarına göre değişimleri incelenmiştir (Şekil 4.22).

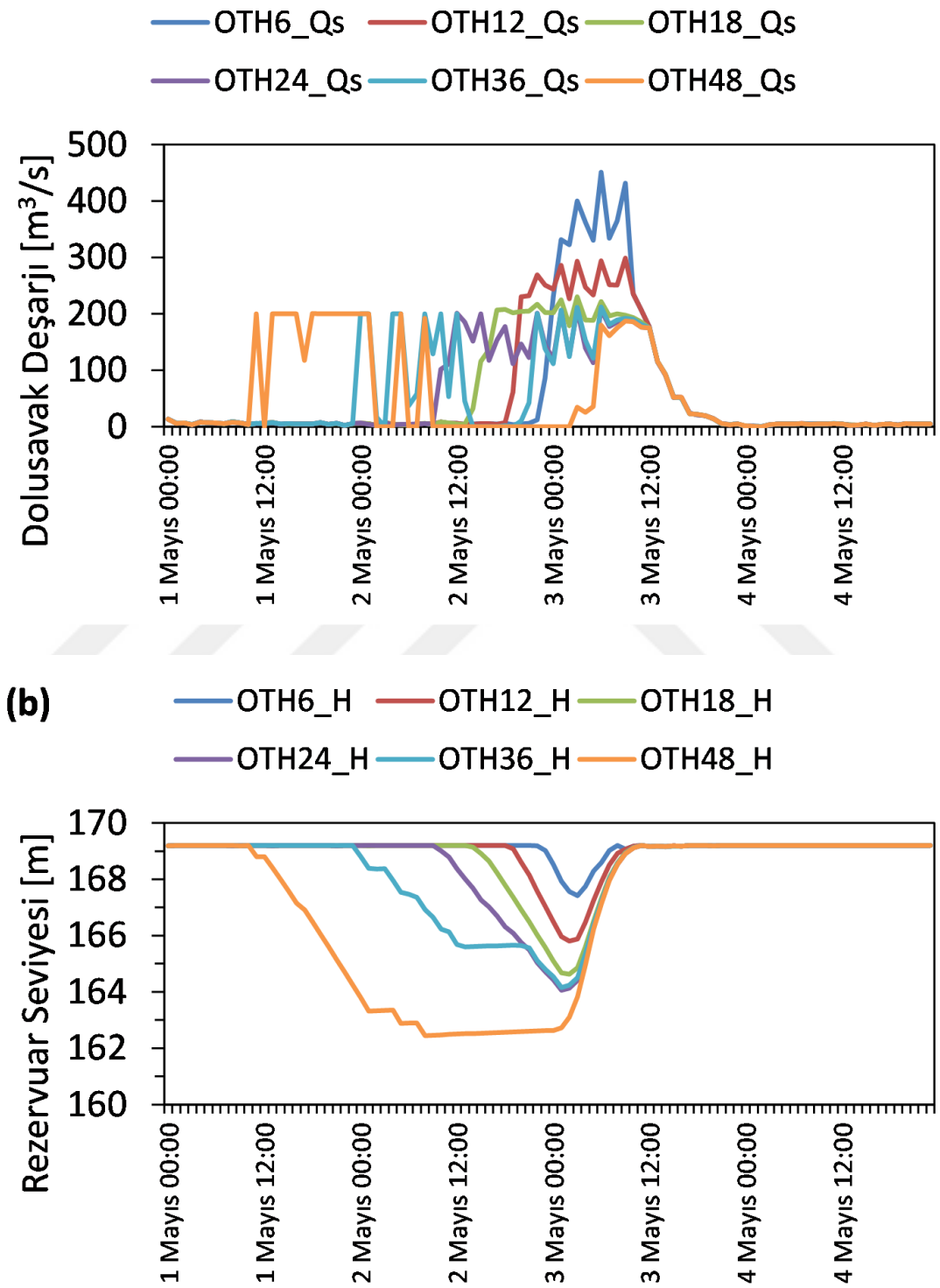
Farklı hata tanımının (burada standart hata) rezervuar işletme performansı üzerindeki sonuçları dikkat çekmektedir. Sıfır hata içeren sonuçlar deterministik moddaki DAT girdi alan DTH ile oldukça benzer sonucu vermektedir. Hata ekleme miktarı arttıkça sonuçlarda da iyileşme olmakla birlikte bu seviyenin bir yerden sonra sabit olduğu da görülmüştür. Bunun sebebi rezervuar seviyesinin gelmesi muhtemel akımlara göre oldukça tutucu bir şekilde düşük seviyede tutulmasıdır. Fakat öte yandan yukarıda Şekil 4.20'de hatırlanıldığı gibi rezervuar seviyesi olay sonunda da istenilen geri depolama seviyesine getirilebilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar; devam eden çalışmanın hangi seviyede belirsizlik içereceğini saptamada önemlidir. Buradan çıkan sonuca göre belirsizlik seviyesi 0.20 (standart hata) olarak seçilmiştir.



Şekil 4.22 *Belirsizlik seviyesi performans karşılaştırılması*

Şekil 4.23'te çoklu-aşama ağaç tabanlı azaltılmış stokastik MÖK hindcast sonuçları, önceki bölümlerle benzer şekilde çeşitli tahmin ufku seçilmesi durumunda dolusavak deşarjları ve rezervuar seviyesi sonuçları olarak sunulmuştur. Deterministik kurulumdan en belirgin fark, tahmin ufkunun artması ile işletme stratejilerinin sürekli olarak değişiklik göstermesidir. Ne kadar uzun tahmin ufku seçilirse o kadar erken deşarj ve düşük rezervuar seviyesi öngörülmektedir. Bunun en temel nedeni daha uzun tahmin ufkunda, daha uzun süreli tahmin verisi kullanılması ve OAT'lerin yapısal olarak artan belirsizlik tanımıdır. Bu sayede stokastik optimizasyonda da ağaç yapısı değişmekte ve

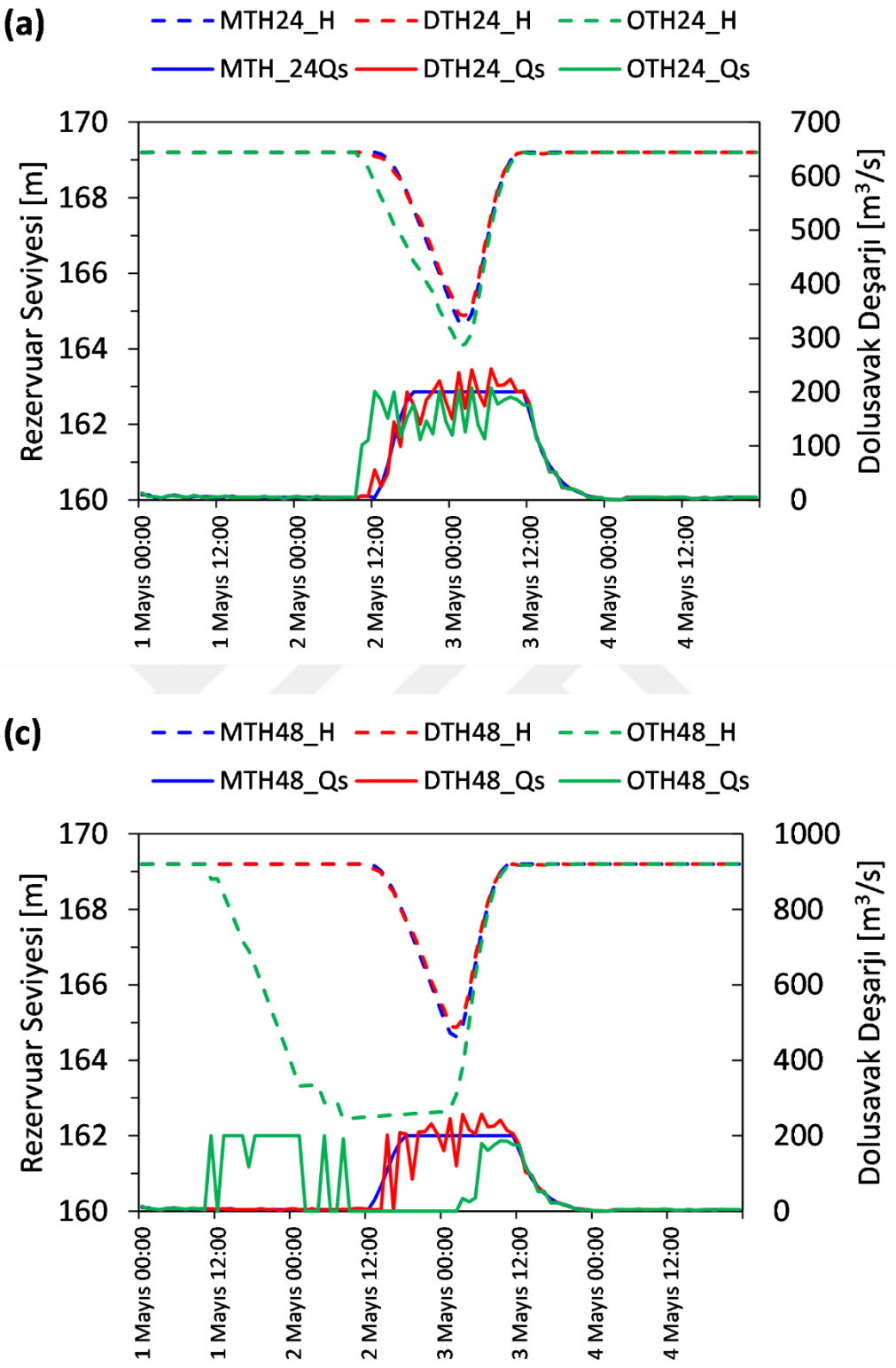
bu durumun deşarj kararlarına önemli bir etkisi olmaktadır. Hindcast periyodunda bakıldığında ise sonuçlar kümülatif olarak etki ederek daha güvenli ve olay sonunda barajı tekrar başlangıç seviyesine getirebilen bir işletme sağlanmış olunur.



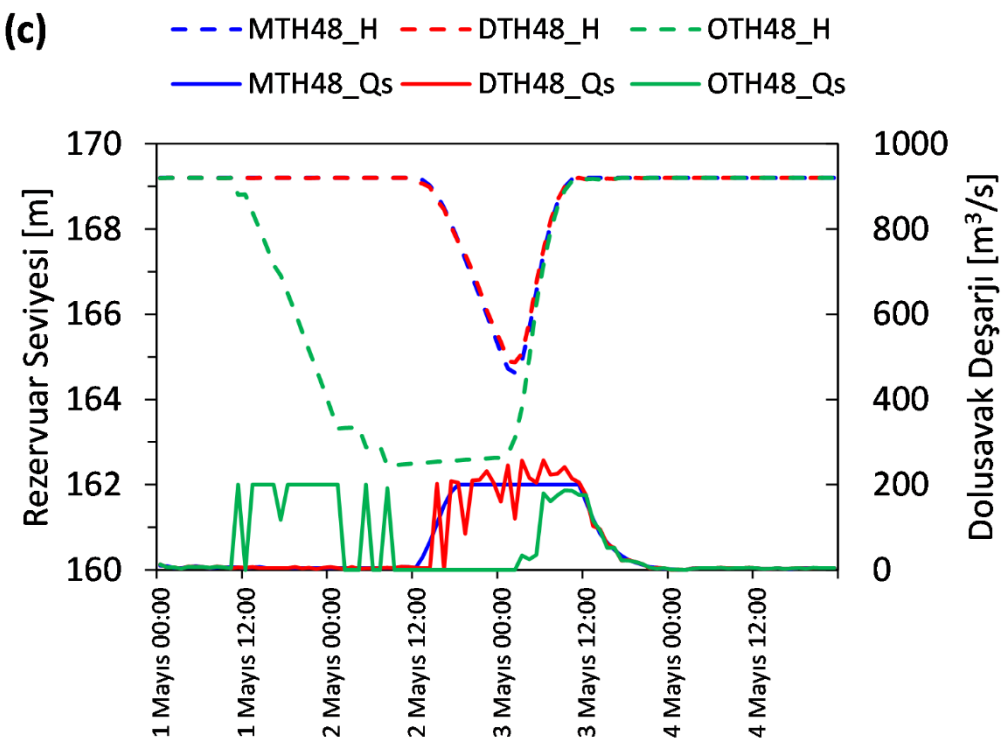
Şekil 4.23 *Olasılıklı tahminler ile hindcast denemeleri tahmin ufku performansının karşılaştırılması (Senaryo-01) (a) Dolusavak deşarjları [m³/s] (b) Rezervuar seviyesi [m]*

4.3.3.4. Saatlik hindcast sonuçlarının karşılaştırılması

Bu kısımda, yukarıda sunulan hinscast test sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir. Şekil 4.24'te farklı hindcast kurulumlarının (MAT, DAT ve OAT verileri ile) seçili 3 farklı tahmin ufku için (24, 36 ve 48 saat) bütün hindcast periyotunda rezervuar seviye ve dolusavak deşarj sonuçları sunulmuştur. MAT ve DAT verisi ile her iki deterministik kurulum sonuçlarının belirli bir tahmin ufkundan sonra değişmediği görülmektedir. Buna karşı, stokastik metot artan belirsizlik girdisi ve ağaç tabanlı azaltma tekniği ile tahmin ufkunun artması durumunda daha erken öncül deşarjlar yaparak daha fazla taşkın hacmi sağlamaktadır. İleride gelmesi beklenen akımların % 100 bilinmesi daha stabil ve kararlı bir işletme sağlamaktayken % 30 hatalı tahmin durumunda, olması gerekenden daha düşük ya da daha yüksek (hatalı) deşarjlar yapılabilmektedir. Buna alternatif olarak sunulan stokastik kurulum, ilerisi için hem daha yüksek hem de daha düşük birçok üye akımı dikkate alarak ve olasılıklarını gözeterek bir karar vermeye çalışır. Bu sebeple de deterministik kuruluma göre daha uzun tahmin ufku seçilmesi bir avantaj olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşım deterministik sonuçlara göre daha güvenilir bir işletme sunar. Ayrıca, bu testlerde (DAT ve OAT için) hindcast yöntemi ile gerçek zamanlı bir tahmin sistemi taklit edildiğinden sistem sonuçları güvenilirdir.

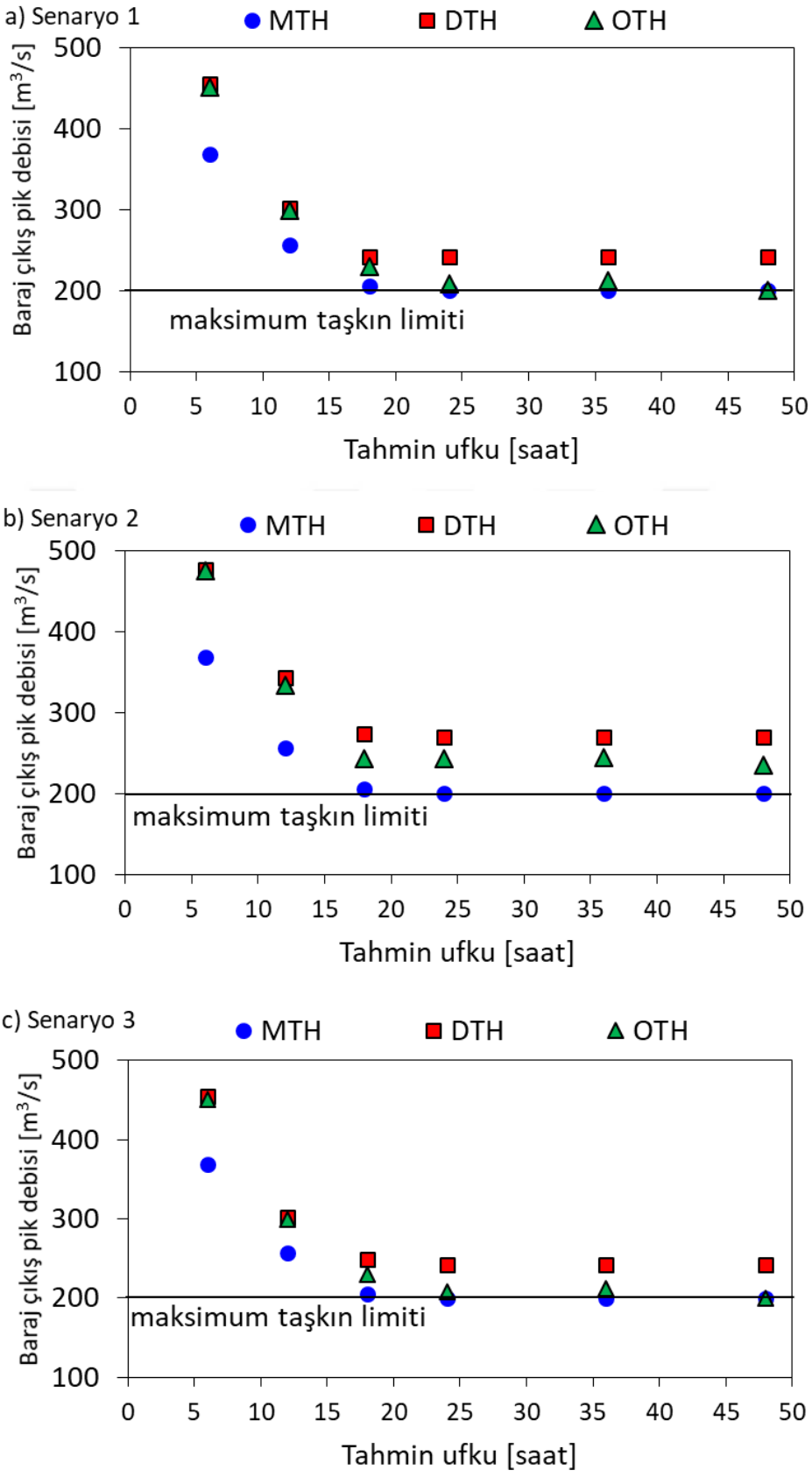


Şekil 4.24 *Üç farklı kurulumda (MTH, DTH, OTH) ve farklı tahmin ufkuna göre rezervuar seviyesi [m] ve dolusavak deşarjlarının [m³/s] karşılaştırılması (Senaryo 01) (a) 24 saat, (b) 36 saat, (c) 48 saat*

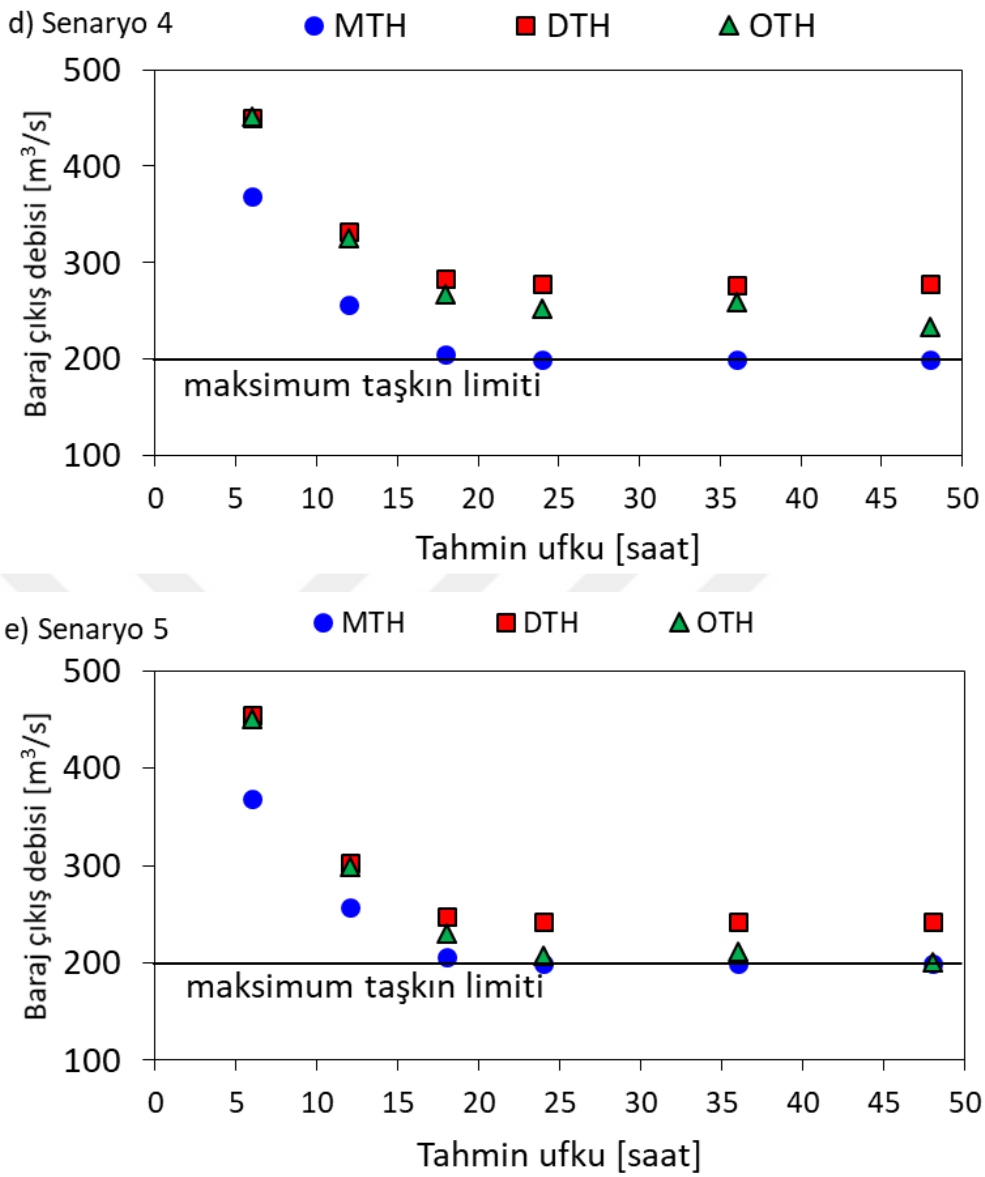


Şekil 4.24 (Devam) *Üç farklı kurulumda (MTH, DTH, OTH) ve farklı tahmin ufkuna göre rezervuar seviyesi [m] ve dolusavak deşarjlarının [m^3/s] karşılaştırılması (Senaryo 01) (a) 24 saat, (b) 36 saat, (c) 48 saat*

Yukarıdaki sonuçlar her zaman adımında değişen DAT tahminlerine ve dolayısıyla da değişen OAT'lere dayanmakla birlikte tek bir senaryo sonucu olarak düşünülebilir (Senaryo-01). Çalışmanın rassal ve birbirinden bağımsız çeşitli farklı senaryolarla denenmesinin sonuçların güvenilirliğine katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Farklı senaryolardan kasıt aynı hindcast periyotunda farklı hindcast testlerinin baştan sona tekrarlanmasıdır. Bu amaçla, çalışma sonuçları yeni dört adet senaryo (toplamda beş adet) ile çeşitlendirilerek geliştirilen metodun dayanıklı ve güvenilir olup olmadığı irdelenmiştir. Şekil 4.25'te her bir senaryonun farklı tahmin ufku ve kurulumda, maksimum dolusavak deşarjları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuçlara göre, tahmin ufkunun artması DTH'ye kıyasla OTH'de fayda sağlar niteliktedir. Ayrıca genel olarak, deterministik optimizasyona kıyasla stokastik optimizasyonda, pik deşarjların azaltılarak iyileştirildiği görülmektedir. Beş senaryonun üçünde (Senaryo-01, Senayo-03 ve Senayo-05) limit dolusavak deşarjları düşürülebilirken; iki senaryoda (Senayo-02 ve Senayo-04) tahmin ufkunun artması ile bir iyileştirme sağlanmasına karşı tamamen hedefe varılamadığı söylenebilir.



Şekil 4.25 *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait pik dolusavak deşarj [m^3/s] performans değerlendirme sonuçları*

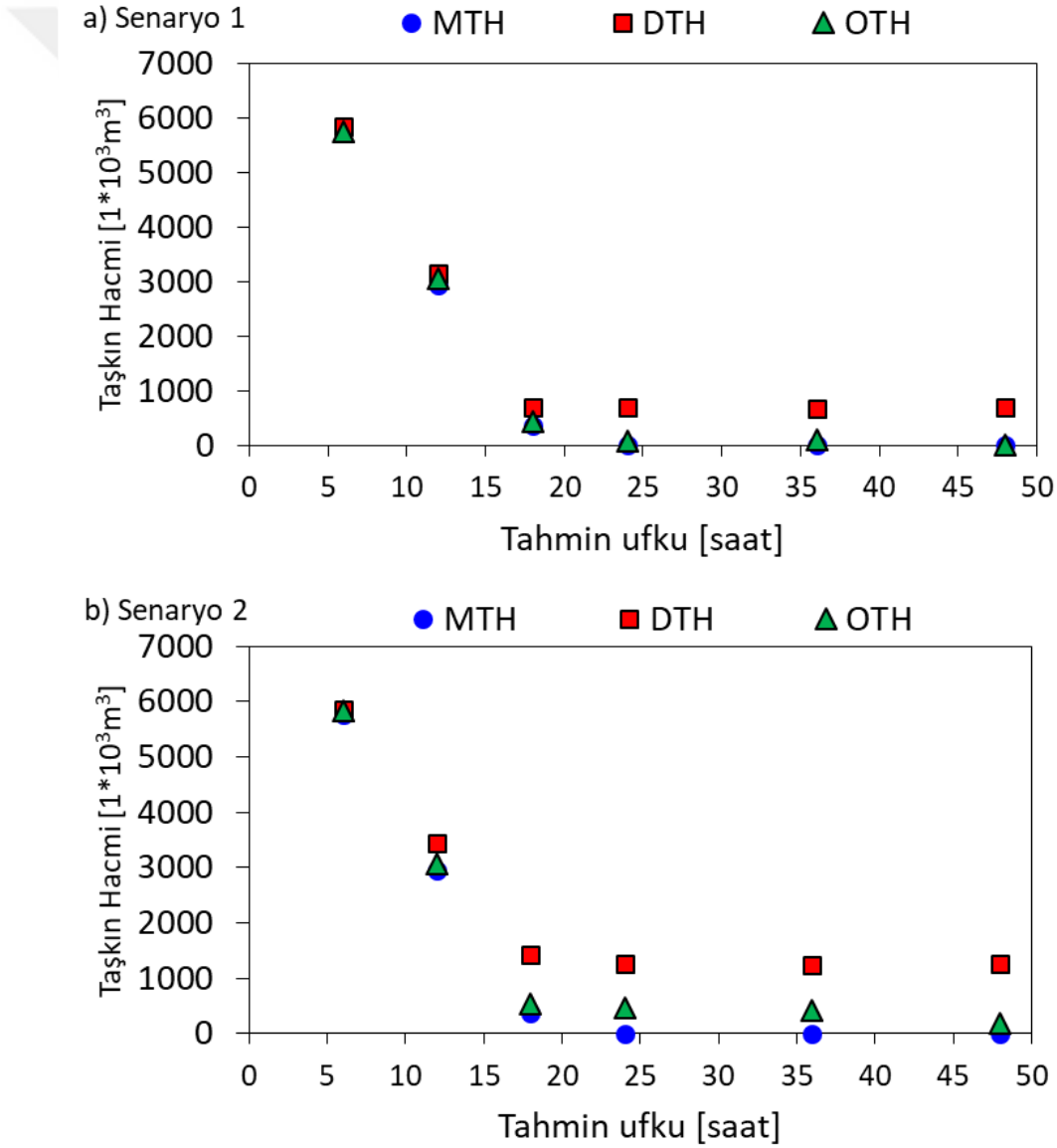


Şekil 4.25 (Devam) *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait pik dolusavak deşarj [m^3/s] performans değerlendirme sonuçları*

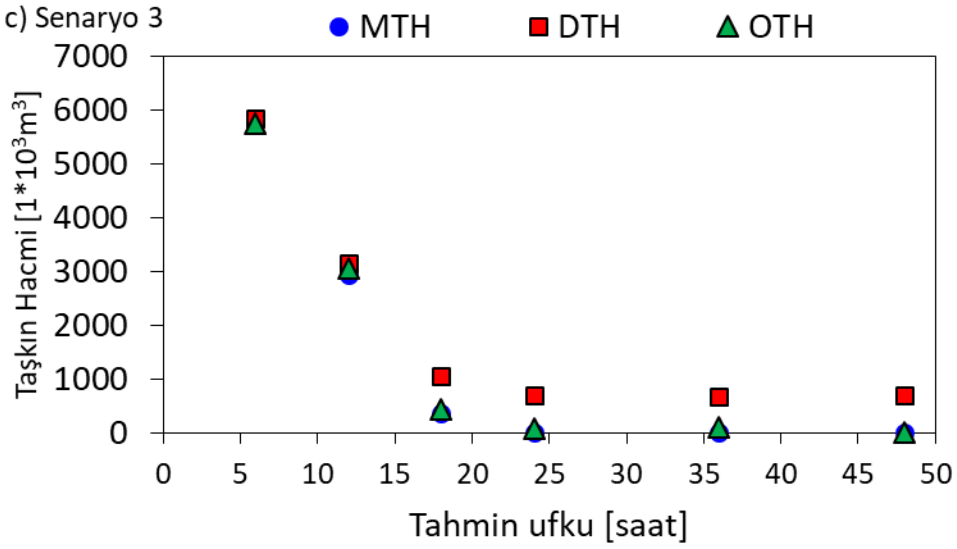
Yapılan çalışma farklı iki işletme optimizasyonu için sadece bir zamanda değerlendirme sağlarken, bütün zaman sürecindeki durum belirsiz kalmaktadır. Bu açıdan, dolsavaktan deşarj edilen miktarların sadece maksimum akım yönünden incelenmesi yetersiz olabilir. Bu nedenle, "mansap kanalından taşan hacim" adı verilen bir hesaplama önerilerek senaryolardaki performansları incelenmiştir. Bu hacim, akımların maksimum limit olan 200 m^3/s sınırını geçtiği anlardaki hacimsel toplamı ile elde edilir. Böylece, mansap kanalında taşacak hacmin dolaylı olarak hesaplandığı

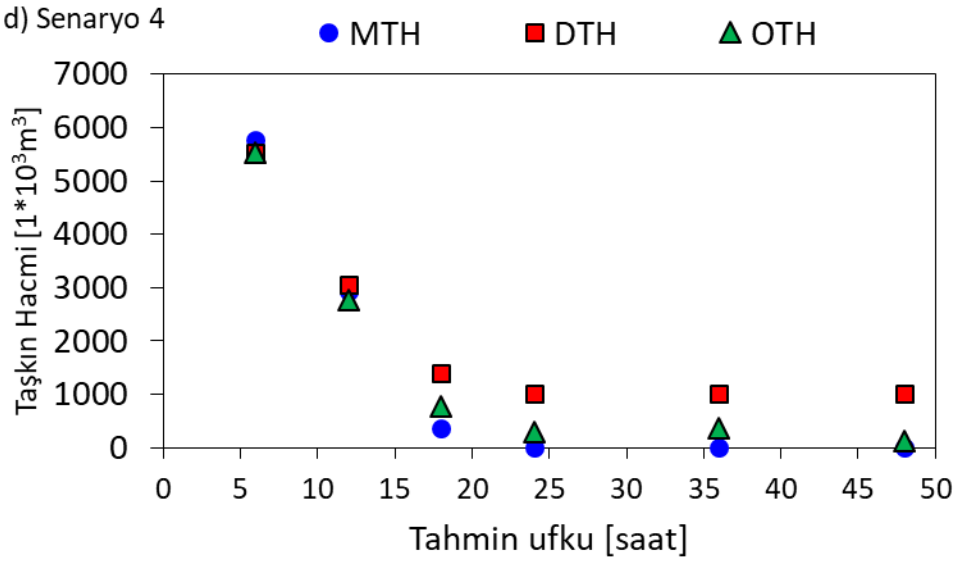
varsayılır. Beklenildiği gibi en iyi performansa sahip "mansap kanalından taşan hacim" sıfıra eşit olmaktadır. Bu ise ancak prensipte yeterli tahmin ufkuna sahip (en az 24 saat) MTH testinde elde edilmektedir.

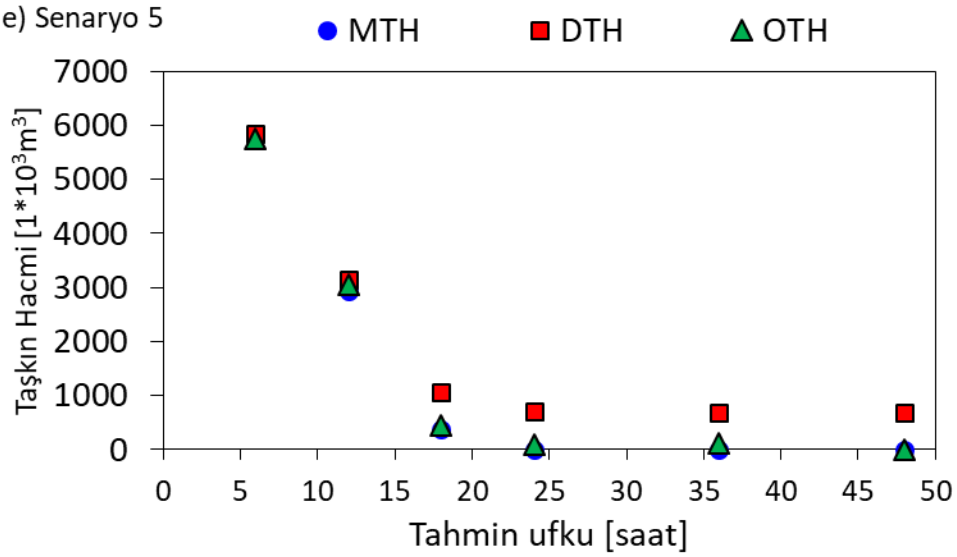
Bütün senaryolara ait sonuçlar Şekil 4.26'da sunulmuştur. 6 ve 12 saat performansları her bir kurulumda eşit ölçüde ve yetersizdir. Tahmin ufku arttıkça (12 saatten sonra) yalnız MTH ve OTH'de iyileşme olmaktadır. Maksimum pik performansına kıyasla "mansap kanalından taşan hacim" tüm senaryolarda, OTH neredeyse MTH'ye yakın sonuçlar vermektedir. Bu bakımdan, OTH testlerinin farklı rassal ve birbirinden bağımsız koşullarda benzer yüksek performansı gösterebildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.26 *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait "mansap kanalından taşan hacim [1000 m³]" performans değerlendirme sonuçları*







Şekil 4.26 (Devam) *Bağımsız 5 farklı senaryo için MTH, DTH ve OTH testlerine ait "mansap kanalından taşan hacim [1000 m³]" performans değerlendirme sonuçları*

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİ VE TAŞKIN KORUMA KONTROL UYGULAMASI (UYG-B)

5.1. Hidroelektrik Santral Örneği

Çalışmanın ikinci uygulama aşamasında (Uygulama-B ya da kısaca UYG-B olarak adlandırılmıştır) hidroelektrik santrali de içeren bir su kaynağı sistemine ait kısa dönemli karar kontrolü üzerinde çalışılmıştır. Hidroelektrik santrallerin optimum işletilmeleri genellikle amaç fonksiyonunda maksimum enerji temin edecek bir kontrol sistemi kurulması ile sağlanmaktadır. Bu ise Bölüm 3'te denklemlerde açıklandığı üzere diğer fiziksel koşullar sabit iken yüksek akım ve düşü sağlanması ile olabilir. Öte yandan enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar da optimizasyonda dikkate alınırlar. Çoklu amaca hizmet eden bir model tasarımı ise birden fazla birbiri ile çelişen kararı sağlayan optimum işletmeyi gerektirebilir. Bu çalışmada, akımlardaki tahmin belirsizliğinin kontrol sistemine dahil edilmesi durumunda dolaylı olarak enerji üretimine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, optimum kontrol problemi aşağıdaki şekilde genişletilmiştir:

i) Modelde deşarj kararı için ek bir çıkış yapısı tanımlanmıştır ve Qt değişkeni bu çıkış yapısından bırakılacak su miktarını temsil etmektedir. Elde edilecek enerji, türbinin konumuna, verimine ve akım miktarına göre farklılık göstermektedir. Türbini tanımlamak için gereken fiziksel parametreler bulunmaktadır. Bunlara çeşitli kabuller ve bilinen fiziksel durumlar üzerinden karar verilmiştir. Örneğin; kuyruksuyu kotu arazi koşulları gözetilerek 105 m olarak alınmıştır. Düşü ise rezervuar seviyesi ve kuyruksuyu kotu arası farklardan hesaplanmıştır. Düşüdeki kayıp doğrudan verimlilik parametresine eklenerek daha düşük bir verimlilik ($\eta = 0.88$) ile çalışılmıştır; ve net düşü hesaplanmıştır.

ii) Daha sonra ise, Qt'nin optimizasyona nasıl dahil olacağı kurgulanmıştır. Bu bağımlı değişkenin optimizasyon amaç fonksiyonunda doğrudan kullanılmasının fazla belirsizlik yaratacağı ve özellikle stokastik modelin boyutunu önemli oranda arttıracağı düşünülmüştür. Problemin olası lokal minimumlara takılması veya çözüme ulaşmaması durumlarını göz ardı etmek için bu uygulamada hidroelektrik için üretim, minimum ve maksimum kısıtlar ile tanımlanmıştır.

Yuvacık Baraj rezervuarı modeli üzerinden bir değişiklik yapılarak bir senaryo durumu oluşturulmuştur. Saatlik işletme modeli için geliştirilen amaç fonksiyonu (Bölüm

4.3.2) doğrudan kullanılmıştır. Kurgulanan modelde azalan ufuk 1 saat ve tahmin ufku 48 saattir. Bundan farklı olarak sisteme bir hidrogüç ünitesi (türbin) eklenmiştir. Rezervuarda depolanan su, içme suyu, hidroelektrik ünitesi ve dolusavak olmak üzere 3 farklı yapıdan alınabilmektedir. Hidroelektrik için bırakılan su (türbinlenen akım, Qt), kısıtlarda tanımlanmış ve çözüm kümesini değiştirmiştir. Optimizasyon sisteminde tanımlanan türbin için modelde Denklem (5.1)'de gösterilen, türbinden geçen akım için aşağıdaki ek kısıt oluşturulmuştur.

$$10\ m^3/s \leq Qt \leq 20\ m^3/s \tag{5.1}$$

Bu şekilde bir tanım ile türbinlenen akım amaç fonksiyonunun optimizasyon değişkeni haline gelmemektedir. Öte yandan, dolusavak deşarjlarındaki amaç fonksiyonu minimize edilirken toplam cezayı azaltmak için mevcut hidroelektrik santral deşarjını arttırma yolunda gideceğinden türbin akımı da dolaylı olarak optimizasyon problemine dahil olmuş olur.

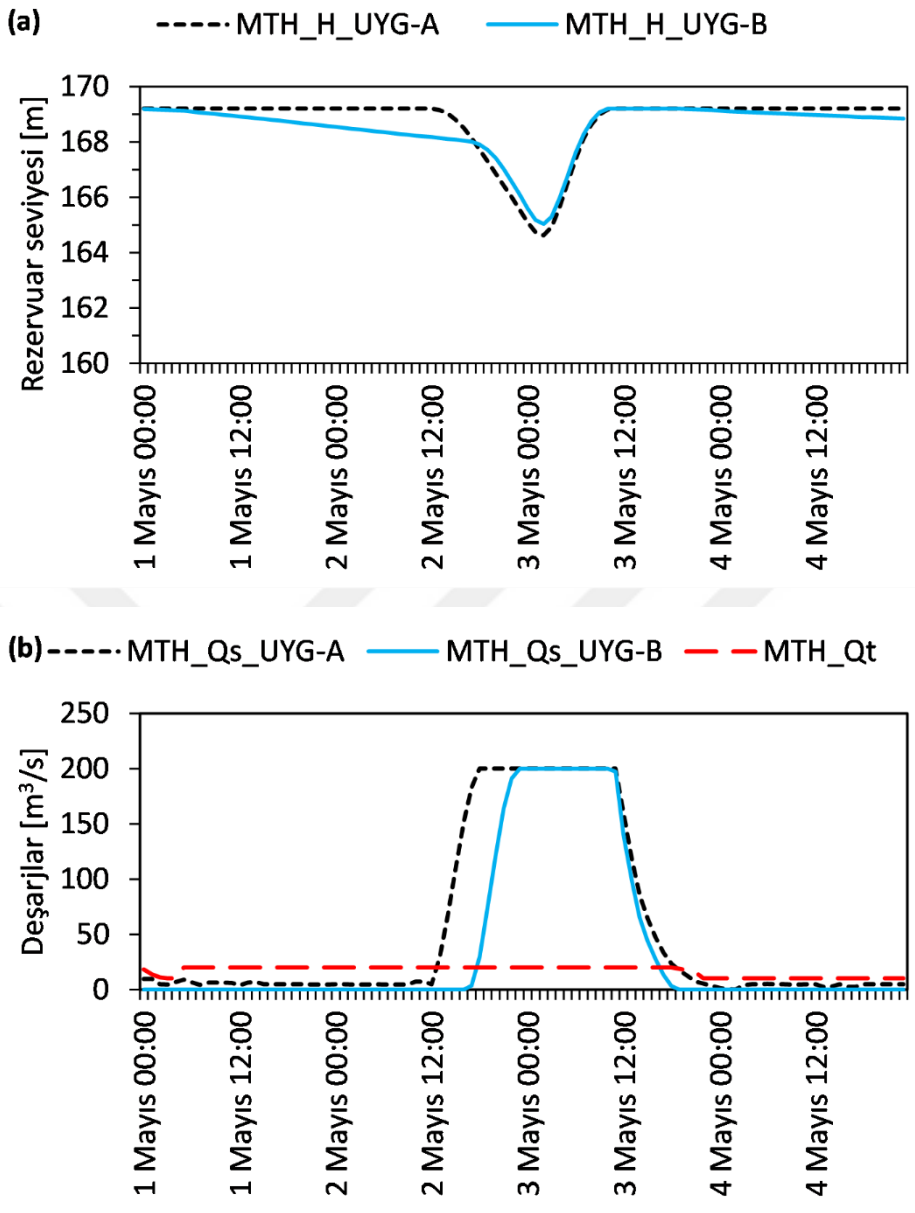
5.2. Testler ve Sonuçları

Bu bölümde, kurulan MÖK ile yapılan farklı hindcast testler uygulanmıştır. Araştırmayı diğer uygulama ile karşılaştırılabilir hale getirmek için UYG-A ile UYG-B hindcast periyodu, taşkın girdi senaryosu ve sentetik akım tahminleri (DAT ve OAT) değiştirilmemiştir.

5.2.1. Mükemmel tahmin hindcast (MTH) testi

İlk aşamada, eklenen hidroelektrik santral elemanının ve türbin deşarjına bağlı yukarıda Denklem (5.1)'de ifade edilmiş kısıtın; mükemmel tahminler ile kapalı-döngü model (gerçek zamanlı kontrol) üzerindeki etkisi ve sonuçların tutarlılığı incelenmiştir. Baraj giriş akımları için gözlenen taşkın hidrografı kullanılarak Şekil 5.1'de rezervuar seviyesinin (H) zaman içerisindeki değişimi ve buna karşılık olarak modelin dolusavak (Qs) ve türbin deşarjları (Qt) sonucu gösterilmiştir. Sonuçlar ayrıca daha önceki model kurulumu (UYG-A, hidroelektrik santralsiz) ile de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur (Şekil 5.1). Kapalı-döngü model sonuçları incelendiğinde, her iki kontrol modelinde de (türbinli ve türbinsiz) rezervuar seviyesinin taşkın kontrolünü sağlayacak şekilde öncül deşarjlar ile düşürüldüğü görülmüştür. Hidroelektrik üretimi eklenmiş durumda sürekli minimum bir üretim sözkonusu olduğundan rezervuar seviyesi sürekli azalan bir gidişe

sahiptir. Dolusavak deşarjları karşılaştırıldığında her iki modelde de maksimum deşarj limiti aşılmadığı ve benzer yapıda (olabildiğince geç fakat mansap kısıtını aşmayacak şekilde) bir işletme gözlenmiştir. En önemli hususlardan birisi ise hidroelektrik santralsiz (UYG-A) kontrolün daha erken ve hacimsel olarak daha fazla dolusavak deşarjı yapmasıdır. Eklenen türbin taşkın yönetiminde modele esneklik kazandırarak belirli bir miktar suyun optimal şekilde buraya yönlendirilmesine ve gereksiz dolusavak akımlarından kaçınılarak modelin daha az ceza alacağını bir şekilde işletme yapmasına imkan tanımıştır. Bu ise sonuçlara daha geç başlayan bir dolusavak deşarj stratejisi ile yansıtılmıştır. Türbinden bırakılan su ise hem minimum kısıtı hem de maksimum kısıtı sağlayacak aralıktadır. Simülasyon başlangıç aşamasında rezervuardan atılması planlanan sudan hem ek bir enerji üretimi sağlanmış (enerji açısından optimize edilmiş) hem de taşkın kontrol açısından istenilen bir işletme gerçekleştirilmiştir. Taşkın olayı öncesinde ve esnasında türbinden maksimum düzeyde akım geçirilmesi sağlanarak fayda elde edilmiştir. Hidroelektrik için bırakılan deşarj, su denkliği denklemlerinde kontrol edilebilir bir değişkendir ve olay öncesi maksimum değerini alır. Bu sayede, taşkın anındaki dolusavak deşarjı azaltılabilir. Diğer önemli bir husus ise, kontrol modelinin taşkın olayı sonrasında tekrar maksimum seviyeye gelecek şekilde kendini adapte edebilmesidir.



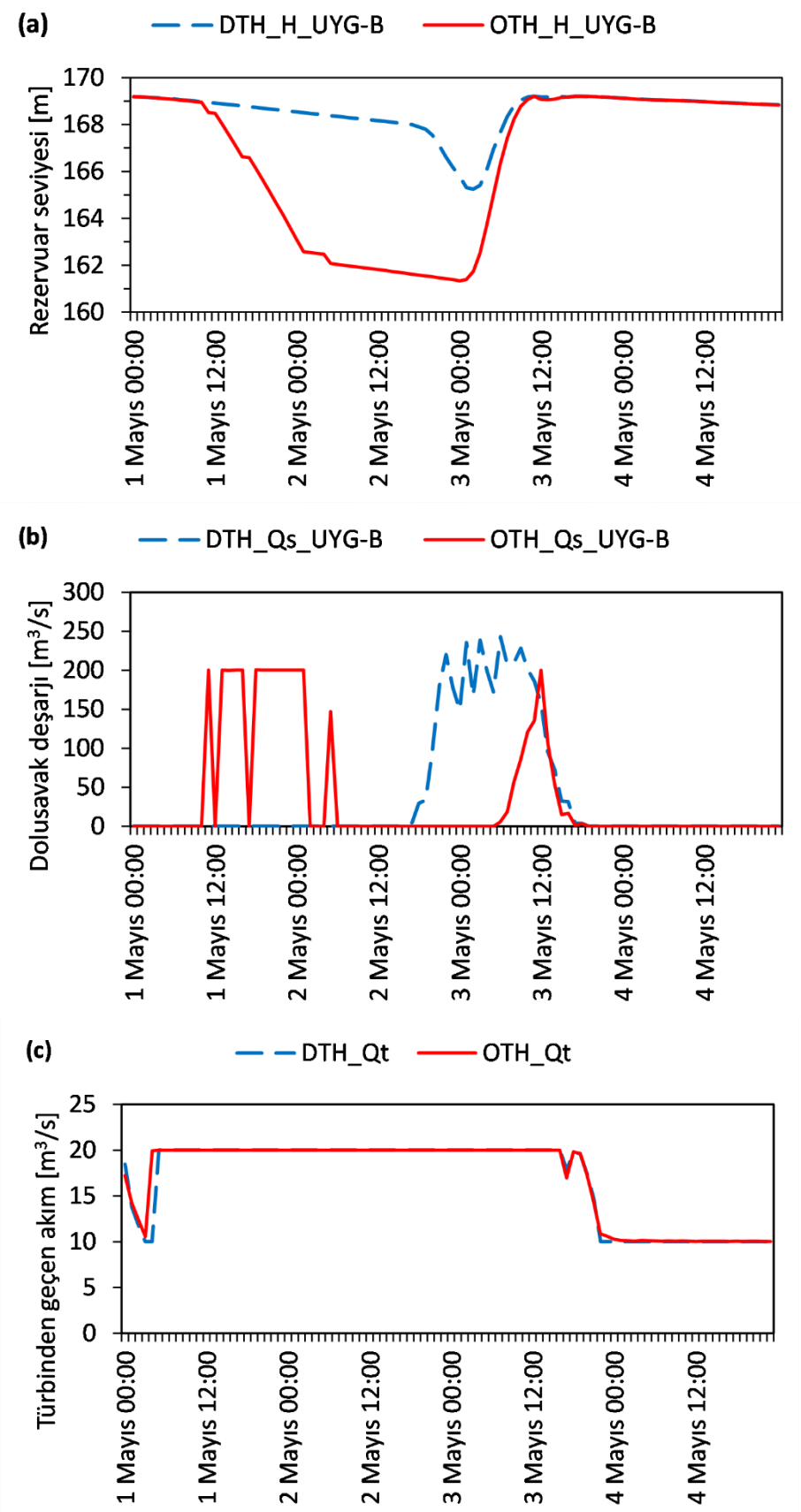
Şekil 5.1 *Hidroelektrik santral içeren örneğin karşılaştırmalı MTH sonuçları (a) Rezervuar seviye değişimi [m] (b) Kontrollü (dolusavak ve türbin) deşarjları [m³/s]*

5.2.2. Deterministik ve olasılıklı tahmin hindcast (DTH ve OTH) testi

Mükemmel tahminler ile denemesi yapılan kontrol modeli, bu kısımda iki farklı (DAT ve OAT) tahmin verisi girdileri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Modeller benzer şekilde bir saat aralıklı kapalı-döngü aralığında ve bir önceki uygulamada (UYG-A) kullanılan tahmin verileri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan test sadece bir tahmini girdi senaryosu ile (Senaryo-1), 1 saat azalan ufuk ve 48 saat tahmin ufku ile test edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar; 3 farklı değişken (rezervuar seviyesi, dolusavak deşarjı ve türbin için bırakılan akım) ile Şekil 5.2'de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hidroelektrik üretimi olmayan duruma benzer şekilde; deterministik model kontrolü stokastik modele göre çok daha geç bir deşarj politikası gütmektedir (Şekil 5.2a). Bu durum dolusavak deşarjlarında daha yüksek akımlara neden olmaktadır. Rezervuar seviyesi genel olarak DTH için her zaman daha üst seviyede tutulmuştur. Her iki işletme kontrol modelinin de taşkın dönemi sonunda tam depolama seviyesine başarılı bir şekilde döndükleri söylenebilir. Dolusavak deşarjları açısından ise mansap koşuluna uygun deşarjın OTH ile sağlandığı gözlenmektedir (Şekil 5.2b). DTH'de bu durumda daha az esnek hareket etmiş ve daha tutucu bir politika güderek beklenenden yüksek akım gelmesi durumunda daha yetersiz sonuçlar sergilemiştir. Ayrıca, OTH'da seçilen uzun tahmin ufkunun da DTH'ye kıyasla daha güvenilir sonuçlar vermesi de OTH'nin bir avantajıdır.

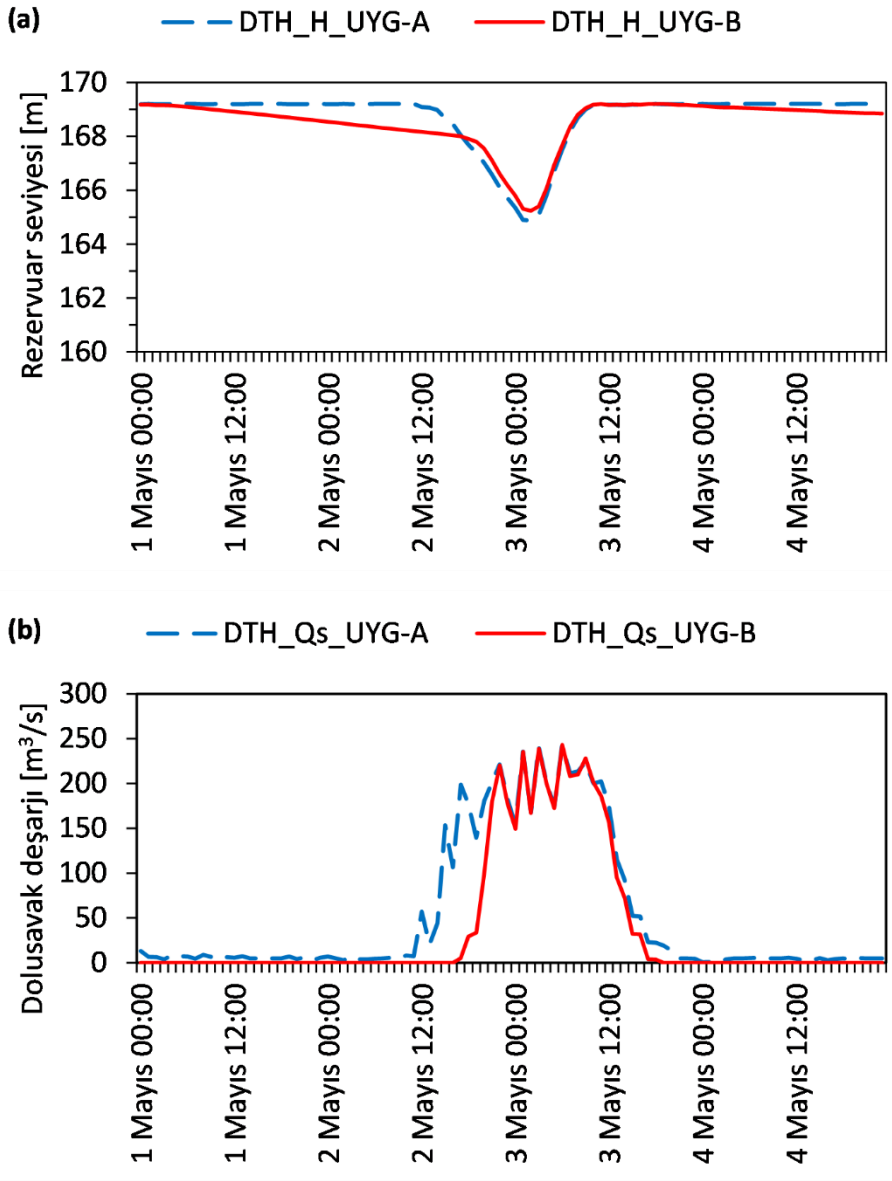
Enerji üretim performansları için türbinden geçen akımlar incelenmiştir. Kontrol sistemleri, türbinden bırakılan akım grafiklerine göre (Şekil 5.2c) enerji üretimi açısından DHT ve OTH için neredeyse benzer sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi, türbinlenen akımın her iki modelde de aynı sert kısıtlar şeklinde tanımlanması ve deşarj kararlarının dolusavak deşarjı üzerinden verilmesidir. OHT kontrol modunda, dolusavak akımları için daha esnek ve mansap kanalı açısından daha güvenilir bir modelleme sergilenirken, enerji üretimi açısından da MTH ya da DTH'ye benzer şekilde ve ödün vermeden enerji üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu ise, işletmeci gözünden çok amacı optimal şekilde sağlayan bir yaklaşım sunarak bu kısımda varılmak istenilen hedefi başarılı ve uygulanabilir hale getirmiştir.



Şekil 5.2 *UYG-A ve UYG-B karşılaştırmalı DTH ve OTH sonuçları (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s) (c) Türbinden bırakılan akım (m^3/s)*

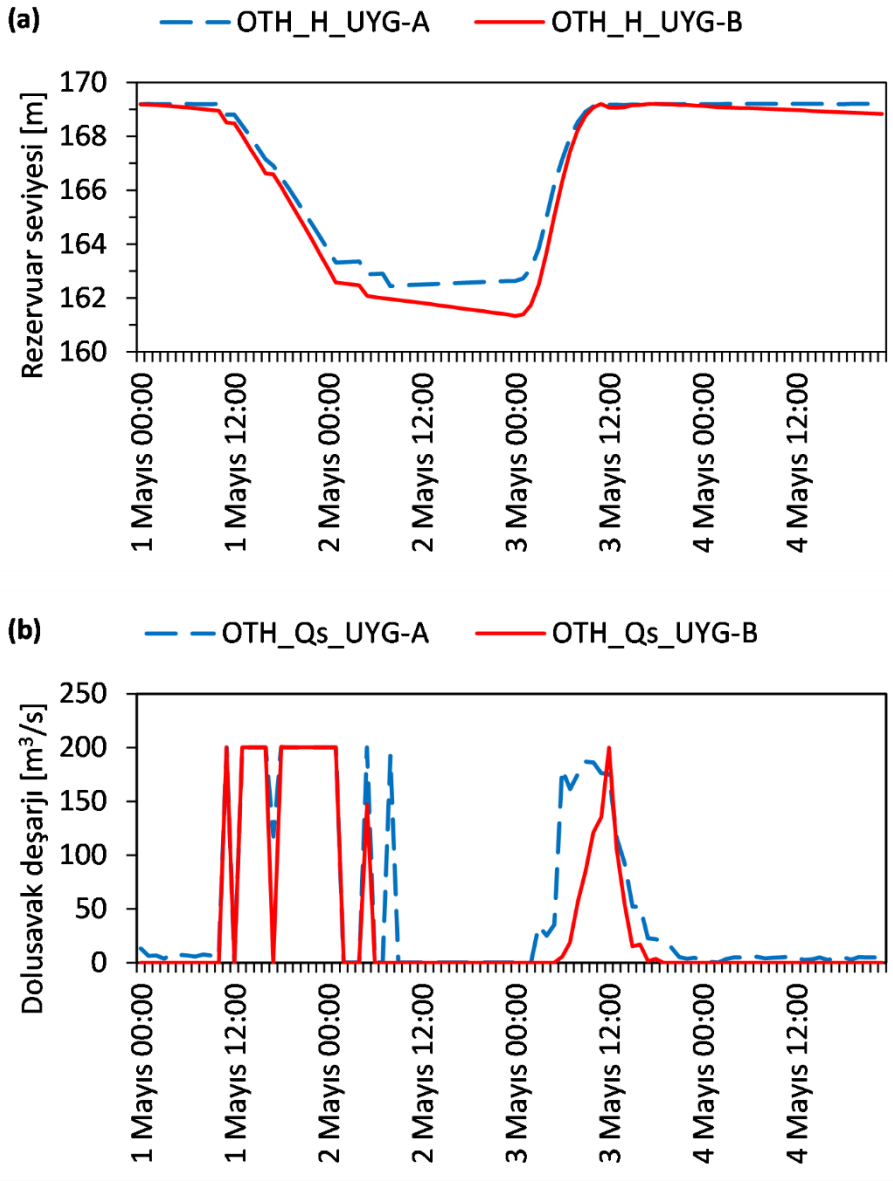
5.2.3. Sonuçların karşılaştırılması

DTH ve OTH testlerine ait sonuçlar, önceki uygulama (UYG-A) ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Şekil 5.3'te karşılaştırma DTH testleri için gösterilmiştir. Buna göre; DTH'de rezervuar seviyesi değişimini MTH'ye benzemekle birlikte dolusavak deşarjları yetersiz tahmin performansından ötürü her iki durumda da ilerleyen zamanlarda benzer sonuçlara yaklaşmıştır. Rezervuar seviyeleri, olay öncesinde daha farklı politikalar güdülerek farklı olmasına karşın; pik akım anında benzer şekildedir. Her iki durumun da deterministik bir yaklaşımda taşkın yarattığı görülmektedir.



Şekil 5.3 *DTH kapalı-döngü işletme sonuçlarının türbinsiz sistemle karşılaştırılması (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s)*

Şekil 5.4'te ise OTH'lerin türbinli ve türbinsiz olma durumları karşılaştırılmıştır. Bu hususta; DTH karşılaştırmalarına nazaran hem düşüşte hem de depolamada farklı rezervuar seviyelerinden söz edilebilir. Bunun sebebi, hem tutucu ve çok öncesinde deşarj yapan stokastik model yapısı hem de her iki çıkış yapısı kullanılması sonucunda rezervuar seviyesinin de daha düşük bir değere düşürülmesidir. Türbinin olduğu fiziksel durumda, geri-depolama zamanında daha ileride fakat görece daha yüksek dolusavak deşarjı dikkat çekmektedir. Fakat yine de taşkın koşulu 200 m^3/s limiti aşılmamaktadır.



Şekil 5.4 *OTH kapalı-döngü işletme sonuçlarının türbinsiz sistemle karşılaştırılması (a) Rezervuar seviye değişimi (m) (b) Dolusavak deşarjlar (m^3/s)*

Son olarak, MTH ve OTH sonuçlarının üretilen enerjiye ait MW cinsinden karşılaştırması incelenerek taşkın yönetiminde enerjiden fedakarlık edilip edilmediği anlaşılmak istenmiştir. Bu analiz ve önceki değerlendirmeler göstermektedir ki, belirsizliğin dahil edildiği bir AT-MÖK ile kısa dönemli taşkın yönetiminde enerji üretiminden fedakarlık yapmadan (R^2=%90) taşkın riski azaltacak kararlar alınabilir.

ALTINCI BÖLÜM

6. SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

6.1. Stokastik Doğada Karar Verme

Gerçek zamanlı bir işletmede verilen optimal kararlar çok sayıda ve sürekli olarak değişen bilgi, çevresel ve işletimsel kısıtlar, geçmiş tecrübeleri ve gelecek kaygıları gözetilerek alınmaktadır. Bu araştırma çalışmasında, bir su kaynağı sisteminin gerçek zamanlı kontrol kararları açısından optimum işletilmesi konusu ele alınmıştır. Kontrol edilen su sistemi için kısıtlı depolamalı hacme sahip bir baraj rezervuarı seçilmiştir. Seçilen rezervuar çoklu-amaca hizmet eden yapısından ötürü zorlayıcı bir işletme politikası gerektirmiş; su temini, taşkın kontrol ve hidroelektrik üretimi gibi birbiri ile çelişen farklı amaçların optimal düzeyde sağlanması hedeflenmiştir. Araştırma aynı zamanda gerçek zamanlı bir işletme modeli kurgulaması açısından dinamik bir süreç kontrolünü de gerektirmiştir.

İşletme modelinin tasarlanması ve yönetimi her su yapısında farklıdır. Bölüm 4.1'de gerçek zamanlı bir kontrolde, Geri Beslemeli basit yaklaşımlardan ve daha karmaşık olan Önsezili Kontrol yaklaşımlara farklı işletme modelleri test edilmiştir. Günlük kararlarda yol gösterici olması için geçmiş yıl verilerine (12 yıl günlük) ve optimizasyona bağlı bir yaklaşımla bir Rehber Eğri (RE) oluşturulmuştur. Bu eğriye göre, yaz aylarında su kesintisi olmaması adına kuru döneme girmeden baraj doldurulmuş; ıslak dönemlerde sağlanan boş depo hacmi ile taşkın olaylarının yönetilmesine imkan verilmiştir. Ayrıca, RE kuraklık ve taşkın senaryoları ile test edilerek güvenirliği ve uygulanabilirliği de ortaya konmuştur. Öte yandan; rezervuarın dolu olduğu zamanlarda gerçekleşmesi muhtemel taşkınlara karşı da öncül deşarj politikası güden bir yaklaşımla Model Önsezili Kontrol (MÖK) geliştirilmiştir. Bu noktada, hindcast testleri ile geçmiş dönem gerçek zamanlı (tahmin destekli) işletme sistemi modellenmiştir. Test sonuçlarına göre özellikle taşkın kontrolü gibi ani ve kısa süreli kararlarda işletme performansını düşüren en büyük nedenin ise akım tahminlerindeki hatalar olduğu görülmüştür.

Günümüz bilim dünyasında modellemelerdeki yaklaşımlar, deterministik bakış açısından stokastik bir bakış açısına doğru evrilmektedir. Gelecek duruma olasılıksal bir yaklaşımla ulaşmayı düşünen Andrey Markov stokastik süreçleri, başlangıç durumu ve geçiş olasılıkları ile hesaplamanın kapısını açmıştır. Hidrolojik tahmin sistemlerinde ise deterministik tekil tahminler yerine olasıklı tahminler üreterek belirsizliği ölçülebilir hale

getirme çalışmaları gün geçtikçe artmaktadır. Stokatik modeller ise deterministik eş değerlerine kıyasla daha karmaşık hesaplamaları gerektirmekte ve çeşitli olasılık kabullerine dayanmaktadır. Öte yandan, çoklu akım tahminleri ise akımlardaki hatayı (belirsizliği) parametrik olmayan şekilde temsil ederler. Çalışma 4.2 Bölüm'de geliştirilen model saatlik modele dönüştürülmüş, deterministik ve olasılıklı tahminlerin MÖK gibi gerçek zamanlı bir kontrolde kullanılabilirlikleri incelenmiş ve karar verme sürecine dahil edilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu süreç yönetiminde, araştırmanın üzerinde durduğu en önemli kriter çoklu veri setlerini rezervuar sistemi optimizasyonu ile bütünleştirmektir. Çoklu akım tahminleri geliştirilen yeni bir yaklaşımla üretilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu esnada görülmüştür ki; deterministik bir yaklaşıma kıyasla stokastik bir yaklaşım ile işletme kararları optimuma daha yakın bir şekilde alınabilir. Fakat aynı zamanda, veri yoğun bu sistemlerde makul çözümler elde etmek için (girdi ve çıktıların ağaç tabanlı yaklaşımla azaltılması gibi) problem boyutunu azaltacak düzenlemeler yapmak gerekmektedir. Bu azaltma politikası, çoklu girdilerdeki benzer üyeleri eleyerek belirsizliğin hangi zamanlarda ortaya çıkacağını daha kesin bir şekilde ifade etmektedir. Ayrıca, kararlı bir çözüm elde etmek için de tahmin ufku, azalan ufuk, tahmin belirsizliği temsiliyeti, ağaç dalı seçilimi gibi farklı kriterlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Çalışmanın 5. Bölümü'nde ise geliştirilen MÖK sisteminde hidroelektrik santral olması durumu sorgulanmış; hidroelektrik santrali de içeren bir rezervuar sistemine ait kısa dönemli karar kontrolü üzerinde çalışılmıştır. Stokastik optimizasyon yaklaşımının; taşkın yönetimi için daha esnek ve daha güvenilir sonuç üretebileceği, enerji üretiminden de ödün vermeden kontrol kararları önerebileceği gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçları ve öneriler ise devam eden alt başlıklarda sunulmuştur.

6.2. Sonuçların Değerlendirilmesi

- Bir işletme çalışmasında karar destek sistemine katkı sağlayacak rezervuar modelleri, optimizasyon-simülasyon birleşimi ile geliştirilebilir. Bu noktada, çalışılan yerin ihtiyaçları gözetilerek, GBK ve MÖK'nin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım ile işletme stratejisi sağlanabilir.
- Geleneksel alternatiflerinden farklı olarak, RE çıkarmak için deterministik MÖK kullanılabilir. Sistem simülasyonu, adjoint model ve IPOPT çözücü tabanlı RTC-Tools sistemi, geliştirilebilecek MÖK yapısı ile olurlu (feasible) ve hızlı çözüm

(düşük çözüm zamanı ile) sunabilmektedir. RE'ye bağlı depolama stratejileri hem GBK'de taşkın hacmi sağlamakta hem de farklı kuraklık senaryolarında maksimum seviyeli GBK'ye yakın sonuçlar vererek su temini açısından güvenilir sonuçlar vermektedir.

- Kısıtlı hacme sahip bir rezervuarda aylık RE'ler ile günlük ve saatlik hassasiyette gerçek zamanlı bir işletme yapmak zorlayıcı olmaktadır. Genelde aylık akım verileri ile yapılan RE çıkarımı bu çalışmada 12 yıla ait günlük veriyle yapılmıştır. Bu sayede, işletme günlük hassasiyete indirilerek taşkın depo hacmi ve biriktirme zamanı için gün mertebesinde değişken bir RE oluşturulabilmiştir.
- RE ile yapılan GBK'nin en büyük eksikliği rezervuarın dolu ya da doldurma aşamasında olduğu durumlarda taşkın kontrolü açısından yetersiz kalmasıdır. Bu aşamada, subjektif bir yaklaşımla verilecek ileri beslemeli kararlar, taşkın olayı sonrasında yetersiz rezervuar depolamasına neden olabilir.
- Araştırma ile geliştirilen yaklaşım RE'nin MÖK ile bütünleştirildiği bir gerçek zamanlı kontrol sistemidir. Bu sayede; hem uzun dönemli hedefler RE ile amaç fonksiyonunda yer almış, hem de sürekli değişen başlangıç koşulları ve kapalı-döngü önsezili (gelecek yörüngeleri hesaba katan) optimizasyon ile dinamik bir sistem kontrolü tasarlanmıştır. Bu noktada, sistemin geleceğe ait ne kadar süreli bilgiyi hesabası katmak gerektiği (tahmin ufku) sorgulanarak açık-döngü ve kapalı-döngü stabilitesi eşitlenmeye ve daha kararlı bir sistem ortaya konmaya çalışılmıştır. Yuvacık Barajı'nda yapılan çalışmada günlük karar verilen bir modelde, 100 yılda bir gelmesi muhtemel taşkın pik akımını mansap bölgesini zarara uğratmadan kontrol etmek için ideal tahmin ufku 2 gün olarak tespit edilmiştir. Tahmin ufku, taşkın debisine bağlı olduğu gibi; taşkının kontrol edildiği rezervuar hacmine de bağlıdır. Bu süre baraj akımlarını toplayan drenaj havzasının büyüklüğü ve barajın kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Başka bölgeler için yapılması düşünülen çalışmalarda tahmine dayalı sisteme geçmeden önce gözlenen akımlar sisteme girdi yapılarak gerekli tahmin ufku belirlenmelidir. Bunun için ise; kapalı döngü ve açık döngü model sonuçları karşılaştırılmalıdır. Gözlenen girdi ile test edilecek kapalı döngü model tahmin ufkunun açık döngü sonuçlarına en yakın olduğu süre gerçek zamanlı işletmede ideal tahmin ufku olarak kullanılabilir.

- Çalışmada, Yuvacık problemi özellikle taşkın kontrol ve su temini açısından ele alınarak farklı amaç fonksiyonu denemeleri yapılmıştır. Amaç fonksiyonu oluşturulması bir optimizasyon çalışmasında önemlidir. Sistemin çözüm kümesinin doğrusal olmayan ve konveks olmadığı bu gibi bir örnekte; olabildiğince basit, fakat aynı zamanda da tüm hedefleri gözeten bir yaklaşım ön plana çıkarılmalıdır. Amaç fonksiyonunda eklenen her bir kontrol değişkeni ise sistemin çözümünü daha da zorlaştırıcı hale getirecektir. Bu noktada, gelişen bilgisayar teknolojilerinin entegre modelleme teknikleri ile birlikte kullanımı fayda sağlayıcıdır.
- Optimizasyon probleminin diğer önemli tarafı fiziksel ya da işletimsel kısıtlardır. Literatürde kısıtlı bir optimizasyon için MÖK'ün geliştirilmesi önerilen bir yaklaşımdır. Bu çalışmada da optimal çözümler sunmuştur.
- Su kaynakları sistemlerinde kontrol diğer sistemlerden farklı olarak sadece optimizasyon algoritmasına bağlı değildir. Uygulama alanı akarsu havzaları olan su bilimciler için en büyük bilinmezlik meteorolojik ve hidrolojik gözlemlerle ilintili olarak ilerisi için baraja gelecek akımlardır. Çalışmanın tahmin değeri incelemesi kısmından çıkan en genel sonuç, sistem ne kadar öngörülü olursa olsun ya da fiziksel durumu gözetirse gözetsin pik akım hatası (örneğin bu çalışmada olduğu gibi % 30) içeren DAT'ler mevcutsa hedeflenenden farklı sonuçlar elde edilebilir.
- Çalışmanın literatür kısmında çok sayıda farklı örnek uygulamada bahsedildiği gibi hataya sahip öngörü kaçınılmazdır. Çalışmada da akım tahminleri ve belirsizliği parametrik olmayan şekilde çoklu olasılıklı üyelerle ifade eden yaklaşımlar gözetilerek yeni bir sentetik metot geliştirilmiştir. Metot, belirsizliğin çeşitli koşullara bağlı ve artan standart hata oranı ile (son zaman anı için maksimumda σ= 0.2'ye varan şekilde) ifade edilmiştir.
- Bu rezervuar için günlük işletme zaman aralığı yetersiz bulunarak çalışma saatlik model uygulamasına geçilmiştir. Gözlem verileri mükemmel tahmin girdisi kabul edilerek buna bağlı optimizasyon sonuçları ise en iyi çözüm (kontrol kararı) olarak ele alınmıştır. Bu kontrol kararları, DAT ve OAT verileri tabanlı MÖK hindcast testleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, çoklu-aşama stokastik optimizasyonun deterministik optimizasyona kıyasla işletme performansında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Stokastik optimizasyon metotları ise çoklu girdilerin artması ile paralel büyüyen problemlere yol açtığından ağaç tabanlı azaltma yöntemleri ile iyileştirilmiştir. AT-MÖK'de bir optimal kontrol serisi yerine birden çok optimal kontrol serileri için optimizasyon yapılmıştır. Çoklu-aşamanın diğer stokastik yöntemlerden farkı girdi yerine çıktıların da çoklu aşamada elde edilebilmesidir. Bu sayede, belirsizliğin zaman içerisinde çözümlendiği bir yaklaşım elde edilmektedir. AT yaklaşımın diğer bir avantajı ise bir sonraki adım için uygulanacak kararın ağaç yapısından ötürü tekil olmasıdır. Ayrıca, azaltılmış girdi yapısı ağaç dalları ile çoklu-aşama stokastik optimizasyonda boyut problemi ile karşılaşılmadan optimum sonuçlar elde edilebilmiştir.
- Geliştirilen ve uygulanan OAT üretiminde tahminlerin ne kadar belirsizlik içermesi gerektiği ve AT-MÖK seçimi için farklı ağaç dalları test edilmiştir.
- Hidroelektrik üretim kısıtının dahil edildiği uygulama da akım belirsizliğini gözeten bir işletme hidroelektrik üretimine dolaylı yoldan da fayda sağlanabildiğini göstermiştir. Kısıtlarda yer alan türbin deşarjı, optimizasyon değişkeni haline getirilerek sistem saatlik taşkın durumunda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, MÖK'nin enerji üretimine katkı sağlarken diğer kısıtları da gözetebildiğini ortaya koymuştur.
- Çalışma sonuçları, özellikle ülkemiz için önem kazanan kısıtlı hacme sahip rezervuarlarda hidroelektrik enerjinin ekonomik bir şekilde işletilmesi için taşkın ve enerji optimizasyonunda tahmin ve işletme modelinin birleştiği karar destek sistemleri üzerine güncel, pratik, bilimsel ve gerçekçi (tutarlılığı yüksek) çözümler üretmek ve uygulama yapmak açısından umut vadedicidir.

6.3. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Son olarak, tez araştırmasının gelecekte yapılması mümkün çalışmalara sunacağı öneriler şunlardır:

(i) Geliştirilen OAT algoritması pertürbe edilmiş DAT verileri üzerinden test edilmiştir. Bu bölgede kurgulanacak saatlik bir hidrolojik model ile OAT'ler doğrudan hidrolojik model tabanlı DAT'lerden elde edilerek gerçek zamanlı bir sistemde gözlem verileri ile test edilebilir. Burada, kullanılacak farklı sayısal hava tahminlerine ait DAT'lerden üretilecek OAT'lerin AT-MÖK'deki performans karşılaştırması literatüre katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, OAT'ler doğrudan sayısal hava tahmin verisi

(Ensemble Prediction System, EPS gibi) tabanlı girdilerin hidrolojik modele girdi yapılması ile üretilebilir. Böylelikle, DAT ve sayısal hava tahmini tabanlı OAT'lerin AT-MÖK'de karşılaştırılmaları yapılabilir.

(ii) Geliştirilen kontrol modeli ardışık rezervuar sisteminde test edilebilir. Bu noktada; model karmaşıklığı ve belirsizliği içeren değişkenler arttıkça çözüme ulaşmak da zorlaşacaktır. Bunun için ise amaç fonksiyonu basitleştirilerek farklı modeller kurgulanıp karşılaştırma yapılabilir.

(iii) Hidroelektrik fiyat ve piyasa bilgilerini içerecek şekilde optimizasyon modeli geliştirilebilir. Bu doğrultuda dolusavak kısıtı kaldırılarak elde edilen yeni hedeflerle RE güncellenebilir. Ayrıca, amaç fonksiyonuna hidroelektrik için de bir değişken tanımlanarak enerji maksimizasyonunun birlikte olduğu bir sistem denemesi yapılabilir.

(iv) Bu gibi çalışmalarda kullanılan IPOPT çözücüsü farklı tolerans kriterlerine göre nümerik bir çözüm sunmaktadır. Hedeflenen tolerans değerlerine ulaşıldığında, çözüm optimal kabul edilmekte; global çözüm ise her zaman garanti edilememektedir. Literatürde (nümerik) yaklaşımla farklı çözücüler denenmiş olmasına karşın bunların yerine son yıllarda önplana çıkan genetik algoritma ve hibrit yaklaşımlar henüz çok fazla denenmemiş ve geliştirmeye açıktır. Özellikle stokastik optimizasyon için bu gibi bir yaklaşımla çözüm arayışı denenebilir.

(v) Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonunda kullanılan ağırlıklar farklı kriterleri tek bir denklemde toplamaya yarar. Bu ağırlıklar çalışmada deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Fakat, benzer çözüm sonuçları verebilecek farklı ağırlıklar da var olabilir. Bu hususta, gelecek çalışmalarda ağırlıklar için Pareto Optimal çözüm aralığının belirlenmesi işletmeciler için fayda sağlayabilir.

(vi) Su, rüzgar, termal ve güneş gibi farklı enerji kaynaklarına aynı anda sahip kurumlar ya da şirketler; enerji ihtiyacı ve mevcut kaynaklar arasında optimal işletmeyi sağlayacak sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu kaynakların daha verimli işletilmesi için hangi kaynağın ne kadar kullanılacağını belirlemek adına ekonomik dağıtım (dispatch) modelleri kullanılmaktadır. Tahmin belirsizliğini gözeten yaklaşımların, ekonomik dağıtım modelleri ile bütünleştirilmesi sayesinde yenilenebilir enerji varlıkları arasında daha az riskli ve daha ekonomik bir yönetim stratejisi geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

Aguilar, J.V., Langarita, P., Rodellar, J., Linares, L. and Horváth, K. (2016). Predictive control of irrigation canals–robust design and real-time implementation. *Water Resources Management*, 30(11), 3829-3843.

Ahmad, A., El-Shafie, A., Razali, S.F.M. ans Mohamad, Z.S. (2014). Reservoir optimization in water resources: a review. *Water Resources Management*, 28(11), 3391-3405.

Ahmadi, M., Haddad, O.B. and Mariño, M.A. (2014). Extraction of flexible multi-objective real-time reservoir operation rules. *Water Resources Management*, 28(1):131-147.

Ahmed, J. A. and Sarma, A. K. (2007). Artificial neural network model for synthetic streamflow generation. *Water Resources Management*, 21(6), 1015.

Aksoy, H., Unal, N.E., Alexandrov, V., Dakova, S. and Yoon, J. (2008). Hydrometeorological analysis of northwestern Turkey with links to climate change. *International Journal of Climatology*, 28(8), 1047-1060.

Akter, T. and Simonovic, S.P. (2004). Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm/Modélisation d'incertitudes dans la gestion de barrage à court terme grâce à des ensembles flous et à un algorithme génétique. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 49(6), 1081–1097.

Alvarado-Montero, R., Schwanenberg, D., Krahe, P., Helmke, P. and Klein, B. (2017). Multi-parametric variational data assimilation for hydrological forecasting. *Advances in Water Resources*, 110, 182-192.

Bellman, R. (1954). The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 60 (6), 503-516.

Bemporad, A. and Morari, M. (1999). Robust model predictive control: A survey. *Robustness in Identification and Control*, 207-226.

Biswas, A.K. (2004). Integrated water resources management: a reassessment: a water forum contribution. *Water International*, 29(2), 248-256.

Blanco, T.B., Willems, P., Chiang, P. K., Haverbeke, N., Berlamont, J. and De Moor, B. (2010). Flood regulation using nonlinear model predictive control. *Control Engineering Practice*, 18(10), 1147-1157.

Brookfield, A.E. and Gnau, C. (2016). Optimizing water management for irrigation under climate uncertainty: evaluating operational and structural alternatives in the Lower Republican River Basin, Kansas, USA. *Water Resources Management*, 30(2), 607-622.

Boucher, M.A., Tremblay, D., Delorme, L., Perreault, L. and Anctil, F. (2012). Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. *Journal of Hydrology*, 416, 133-144.

Cigizoglu, H.K., Bayazit, M. and Önöz, B. (2005). Trends in the maximum, mean, and low flows of Turkish rivers. *Journal of Hydrometeorology*, 6(3), 280-290.

Chang, L.C. and Chang, F.J. (2001). Intelligent control for modelling of real-time reservoir operation. *Hydrological Processes*, 15(9), 1621-1634.

Chang, F.J., Chen, L. and Chang, L.C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 19(11), 2277-2289.

Che, D. and Mays, L.W. (2015). Development of an optimization/simulation model for real-time flood-control operation of river-reservoirs systems. *Water Resources Management*, 29(11), 3987-4005.

Chen, J., Brissette, F.P. and Leconte, R. (2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3), 190-202.

Cloke, H.L. and Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: a review. *Journal of Hydrology*, 375(3), 613-626.

Dalfes, H.N., Karaca, M. and Sen, O.L. (2007) Climate change scenarios for Turkey. In: Climate change and Turkey – impacts, sectoral analyses, socio-economic dimensions. United Nations Development Programme, Turkey office, 2007.

Datta, B. and Burges, S. J. (1984). Short-term, single, multiple-purpose reservoir operation: Importance of loss functions and forecast errors. *Water Resources Research*, 20(9), 1167-1176.

De Roo, A.P.J., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bartholmes, J., Bongioannini-Cerlini, P., Todini, E., Bartes, P.D., Horritt, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hils, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Reggiani, P., Van Dijk, M., Sattler, K. and Sprokkereef, E.S. (2003). Development of a European flood forecasting system. *International Journal of River Basin Management*, 1(1), 49-59.

Dietrich, J., Schumann, A. H., Redetzky, M., Walther, J., Denhard, M., Wang, Y., Pfützner, B. and Büttner, U. (2009). Assessing uncertainties in flood forecasts for decision

making: prototype of an operational flood management system integrating ensemble predictions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1529-1540.

Ding, Y. and Wang, S.S. (2006). Optimal control of open-channel flow using adjoint sensitivity analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1215-1228.

Döll, P., Jiménez-Cisneros, B., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Jiang, T., Kundzewicz, Z.W., Mwakalila, S. and Nishijima, A. (2015). Integrating risks of climate change into water management. *Hydrolog Sciences Journal*, 60 (1), 4–13.

Dubrovin, T., Jolma, A. and Turunen, E. (2002). Fuzzy model for real-time reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(1), 66-73.

Dupačová, J., Gröwe-Kuska, N. and Römisch, W. (2003). Scenario reduction in stochastic programming. *Mathematical Programming*, 95(3), 493-511.

Faber, B.A. and Stedinger, J.R. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*, 249(1), 113-133.

Fan, F.M., Schwanenberg, D., Alvarado, R., dos Reis, A.A., Collischonn, W., and Naumman, S. (2016). Performance of deterministic and probabilistic hydrological forecasts for the short-term optimization of a tropical hydropower reservoir. *Water Resources Management*, 30(10), 3609-3625.

Galelli, S., Goedbloed, A., Schwanenberg, D. and van Overloop, P.J. (2012). Optimal real-time operation of multipurpose urban reservoirs: Case study in Singapore. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 511-523.

Giorgi, F., Im, E.S., Coppola, E., Diffenbaugh, N.S., Gao, X.J., Mariotti, L., and Shi, Y. (2011). Higher hydroclimatic intensity with global warming. *Journal of Climate*, 24(20), 5309-5324.

Gleick, P.H. (2000) *The world's water 2000–2001: The biennial report on freshwater resources*. Washington DC, USA: Island Press'den aktarılan Kirby, R. M., Bartram, J., and Carr, R. (2003). Water in food production and processing: quantity and quality concerns. *Food Control*, 14(5), 283-299.

Goubanova, K. and Li, L. (2007). Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 57(1), 27-42.

Gouweleeuw, B.T., Thielen, J., Franchello, G., De Roo, A.P.J. and Buizza, R. (2005). Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4), 365-380.

Göncü, S. and Albek, E. (2016). Statistical downscaling of meteorological time series and climatic projections in a watershed in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(1-2), 191-211.

Growe-Kuska, N., Heitsch, H. and Romisch, W. (2003). Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems. *In Power tech conference proceedings*, IEEE Bologna, Italy (Vol. 3, pp. 7-pp).

Heitsch, H. and Römisch, W. (2003). Scenario reduction algorithms in stochastic programming. *Computational Optimization and Applications*, 24(2-3), 187-206.

Hsu, N.S. and Wei, C.C. (2007). A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion. *Journal of Hydrology*, 336(3), 282-293.

Horváth, K., Galvis, E., Valentín, M.G. and Rodellar, J. (2015). New offset-free method for model predictive control of open channels. *Control Engineering Practice*, 41, 13-25.

Hui, P. (2002). *Yellow River group project, a subproject of the China-DC WRE project*. Final research report of Cluster 2. Delft, the Nederlands.

http://oss.deltares.nl/web/delft-fews/

https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/

Johnell, A., Lindström, G. and Olsson, J. (2007). Deterministic evaluation of ensemble streamflow predictions in Sweden. *Hydrology Research*, 38(4-5), 441-450.

Jørgensen, J.B. (2005). *Moving horizon estimation and control*. PhD Thesis. Copenhagen: Technical University of Denmark, Department of Chemical Engineering.

Karadağ, A. A. (2008). Türkiye'deki su kaynakları yönetimine ilişkin sorunlar ve çözüm önerileri. TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi'de sunulan bildiri. 389-400. http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/10946.pdf (Erişim tarihi: 01.05.2017).

Karamouz, M., Szidarovszky, F. and Zahraie, B. (2003). *Water resources systems analysis*, Boca Raton, FL: CRC Press.

Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E. and Yuan, S. Q. (1990). Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation. *Water Resources Research*, 26(3), 447-454.

Kim, Y.O., Eum, H.I., Lee, E.G. and Ko, I.H. (2007). Optimizing operational policies of a Korean multireservoir system using sampling stochastic dynamic programming with ensemble streamflow prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 4-14.

King, L.W. (2014). *Hammurabi's code of laws*. Netlancers Inc:Skyros Publishing.

Koutsoyiannis, D. (2002). The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 573-595.

Kuczera, G. and Parent, E. (1998). Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1), 69-85.

Labadie, J.W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111.

Le Ngo, L., Madsen, H., Rosbjerg, D. and Pedersen, C.B. (2008). Implementation and comparison of reservoir operation strategies for the Hoa Binh reservoir, Vietnam using the MIKE 11 model. *Water Resources Management*, 22(4), 457-472.

Li, X., Guo, S., Liu, P. and Chen, G. (2010). Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal of Hydrology*, 391(1), 124-132.

Liu, X., Guo, S., Liu, P., Chen, L. and Li, X. (2011). Deriving optimal refill rules for multi-purpose reservoir operation. *Water Resources Management*, 25(2), 431-448.

Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D.J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A. I. J. M., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S. J., Rakovec, O. and Restrepo, P. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3863-3887.

Liu, Z., Guo, Y., Wang, L. and Wang, Q. (2015). Streamflow forecast errors and their impacts on forecast-based reservoir flood control. *Water Resources Management*, 29(12), 4557-4572.

Malaterre, P.O. (2007). Control of irrigation canals: why and how?. *International workshop on numerical modelling of hydrodynamics for water resources*'de sunulan bildiri. İspanya: Zaragoza Üniversitesi.

Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V. and Scokaert, P.O. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6), 789-814.

Mehrmann, V.L. (1991). *The autonomous linear quadratic control problem: theory and numerical solution* (Vol. 163). Berlin: Springer.

Morari, M. and Lee, J.H. (1999). Model predictive control: past, present and future. *Computers & Chemical Engineering*, 23(4), 667-682.

Montero, R.A., Schwanenberg, D., Hatz, M. and Brinkmann, M. (2013). Simplified hydraulic modelling in model predictive control of flood mitigation measures along rivers. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1(1), 17-27.

Montero, R.A., Schwanenberg, D., Krahe, P., Lisniak, D., Sensoy, A., Sorman, A. A. and Akkol, B. (2016). Moving horizon estimation for assimilating H-SAF remote sensing data into the HBV hydrological model. *Advances in Water Resources*, 92, 248-257.

New Castle (2001). *Kirazdere reservoir operating strategy*. Final project report. Water Resource Systems Research Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Newcastle, United Kingdom.

Ochoa-Rivera, J.C., García-Bartual, R. and Andreu, J. (2002). Multivariate synthetic streamflow generation using a hybrid model based on artificial neural networks. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(4), 641-654.

Oliveira, R. and Loucks, D.P. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.

Önol, B. and H.M., Semazzi, F. (2009). Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 22(8), 1944-1961.

Pianosi, F. and Raso, L. (2012). Dynamic modeling of predictive uncertainty by regression on absolute errors. *Water Resources Research*, 48(3).

Puterman, M.L. (2014). *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. Hoboken, New Jerse:John Wiley & Sons.

Rani, D. and Moreira, M.M. (2010). Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 24(6), 1107-1138.

Ramos, M.H., Van Andel, S.J. and Pappenberger, F. (2013). Do probabilistic forecasts lead to better decisions?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), 2219.

Rao, Z., O'Connell, P.E., Cook, D.J., and Jamieson, D.G. (2001). Deriving robust operating rules for the interim control of the Kirazdere reservoir. *Water Science and Technology*, 43(5), 277-284.

Raso, L., Giesen, N., Stive, P., Schwanenberg, D. and Overloop, P. J. (2013). Tree structure generation from ensemble forecasts for real time control. *Hydrological Processes*, 27(1), 75-82.

Raso, L., Schwanenberg, D., van de Giesen, N.C. and van Overloop, P.J. (2014). Short-term optimal operation of water systems using ensemble forecasts. *Advances in Water Resources*, 71, 200-208.

Raso, L., Malaterre, P.O. and Bader, J.C. (2017). Effective Streamflow Process Modeling for Optimal Reservoir Operation Using Stochastic Dual Dynamic Programming. *Journal of Water Resources Planning and Managem*ent, 143(4), 04017003.

Roulin, E. (2006). Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 1369-1406.

Roulin, E. and Vannitsem, S. (2005). Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *Journal of Hydrometeorology*, 6(5), 729-744.

Sensoy, S., Demircan, M. and Alan, I. (2008). Trends in Turkey climate extreme indices from 1971 to 2004. *In Third International Conference BALWOIS*, Ohrid, Macedonia.

Şensoy, A. (2012). *Havza ve rezervuar modellemesi ile karar destek sistemi oluşturarak kısa ve uzun dönemli baraj işletmesi*. TÜBİTAK-ÇAYDAG 1001 Araştırma Projesi (No: 109Y218), Final Raporu.

Şensoy, A., Uysal, G. and Şorman, A.A. (2016). Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models. *Journal of Flood Risk Management*. doi:10.1111/jfr3.12280

Schaake, J.C. (2014). From operational hydrological forecast to reservoir management optimization. *Hydrologic Ensemble Prediction: Past, Present and Future, workshop*'da sunulan bildiri. Québec City, Canada.

Schwanenberg, D. and Becker, B. (2009). *Software tools for modeling real-time control reference manual (version: 1.0.27049)*. Delft:Deltares.

Schwanenberg, D., Becker, B.P.J. and Xu, M. (2015). The open real-time control (RTC)-Tools software framework for modeling RTC in water resources sytems. *Journal of Hydroinformatics*, 17(1), 130-148.

Schwanenberg, D., Fan, F.M., Naumann, S., Kuwajima, J.I., Montero, R.A. and dos Reis, A.A. (2015). Short-term reservoir optimization for flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty. *Water Resources Management*, 29(5), 1635-1651.

Simonovic, S.P. and Burn, D.H. (1989). An improved methodology for short-term operation of a single multipurpose reservoir. *Water Resources Research*, 25(1), 1-8.

Stive, P.M. (2011) *Performance assessment of tree-based model predictive control*. Master Thesis. Delft:Delft University of Technology.

Thames Water (2001). *Yuvacık Dam operation Maintenance manual, vol 1*. Thames Water Turkey Dam Department, Kocaeli.

Tunçok, K. (2008) Entegre havza idaresi çerçevesinde baraj işletmeciliği, *TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi*'de sunulan bildiri. 279-289. http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/10935.pdf (Erişim tarihi: 01.05.2017).

Tung, Y.K. and Mays, L.W. (1980). Risk analysis for hydraulic design. *Journal of the Hydraulics Division*. 106(5), 893-913.

Todini, E. (2004). Role and treatment of uncertainty in real-time flood forecasting. *Hydrological Processes*, 18(14), 2743-2746.

Todini, E. (2017). Flood Forecasting and Decision Making in the new Millennium. Where are We?. *Water Resources Management*, 1-19. DOI10.1007/s11269-017-1693-7.

Uysal, G. (2012). Developing a decision support system using hec-ressim model for operation of Yuvacik dam reservoir, Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Uysal, G., Akkol, B., Ertaş, M.C., Çoşkun, C., Şorman, A.A., Şensoy Şorman, A. and Schwanenberg, D. (2015) Developing an operational hydrologic forecast system using EPS and satellite data in mountainous basins of Turkey, *Delft Software Days'*de sunulan bildiri. Hollanda: Deltares.

Uysal, G., Şensoy, A., Şorman, A.A., Akgün, T. and Gezgin, T. (2016) Basin/reservoir system integration for real time reservoir operation. *Water Resources Management*, 30(5):1653-1668.

Uysal, G., Schwanenberg, D., Alvarado Montero, R., Sensoy, A. and Sorman, A. (2017a). Short-term operation of multi-purpose reservoir using model predictive control. *EGU General Assembly Conference*'da sunulan poster (Vol. 19, p. 18793). Vienna, Avustria.

Uysal, G., Schwanenberg, D., Alvarado-Montero, R. and Şensoy, A. (2017b). Short term optimal operation of water supply reservoir under flood control stress using model predictive control. *Water Resources Management*, 1-15.

Uysal, G., Schwanenberg, D., Alvarado Montero, R., Sensoy, A. and Arda Sorman, A. (2017c). Baraj işletme kararları için rehber eğri çıkarılması, *IX. Ulusal Hidroloji Kongresi*'nde sunulan bildiri, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.

Uysal, G., Alvarado-Montero, R., Schwanenberg, D. and Şensoy, A. (2017d). Real-time flood control by tree-based model predictive control including forecast uncertainty. (Hakem değerlendirmesinde).

Uysal, G. Şensoy, A., Schwanenberg, D. and Alvarodo-Montero, R. (2017e) Short-term control of a storage hydropower under flood risk by multi-stage stochastic optimization, *13th International Conference on Hydroinformatics (HIC)*. (Hakem değerlendirmesinde).

Wahlin, B.T. and Clemmens, A.J. (2006). Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: theory. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(3), 198-207.

Wan, W., Zhao, J., Lund, J.R., Zhao, T., Lei, X. and Wang, H. (2016). Optimal Hedging Rule for Reservoir Refill. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11), 04016051.

Watkins, D.W., McKinney, D.C., Lasdon, L.S., Nielsen, S.S. and Martin, Q.W. (2000). A scenario-based stochastic programming model for water supplies from the highland lakes. *International Transactions in Operational Research*, 7(3), 211-230.

Watts, G., Battarbee, R.W., Bloomfield, J.P., Crossman, J., Daccache, A., Durance, I., ... and Hess, T. (2015). Climate change and water in the UK–past changes and future prospects. *Progress in Physical Geography*, 39(1), 6-28.

Wächter, A., & Biegler, L. T. (2006). On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. Mathematical programming, 106(1), 25-57.

WCD (World Comission on Dams), (2000). *Dams and development: a new framework for decision-making*. London:Earthscan.

Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., and Heynert, K. (2013). The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software*, 40, 65-77.

Wu, M.C. and Lin, G.F. (2017). The very short-term rainfall forecasting for a mountainous watershed by means of an ensemble numerical weather prediction system in Taiwan. *Journal of Hydrology*, 546, 60-70.

www.izmitsu.com.tr

Van Overloop, P.J. (2006). *Model predictive control on open water systems*. Delft:Delft University Press.

van Overloop, P.J., Weijs, S. and Dijkstra, S. (2008). Multiple model predictive control on a drainage canal system. *Control Engineering Practice*, 16(5), 531-540.

Xu, M., Van Overloop, P. J., Van De Giesen, N. C. and Stelling, G. S. (2010). Real-time control of combined surface water quantity and quality: polder flushing. *Water Science and Technology*, 61(4), 869-878.

Yan, B., Guo, S. and Chen, L. (2014). Estimation of reservoir flood control operation risks with considering inflow forecasting errors. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2), 359-368.

Yanmaz, M. (2013) *Applied water resources engineering*. (4th Edition). Ankara:METU Press.

Yao, H. and Georgakakos, A. (2001). Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios: 2. Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 249(1), 176-196.

Yeh, W.W.G. (1985). Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.

Yilmaz, K.K. and Yazicigil, H. (2011). *Climate change and its effects on water resources* içerisinde Potential impacts of climate change on Turkish water resources: a review. (pp. 105-114). Dordrecht: Springer.

Young, G.K. (1967). Finding reservoir operating rules. *Journal of the Hydraulics Division*, 93(6), 297-322.

Yurtal, R., Seckin, G. and Ardiclioglu, G. (2005). Hydropower optimization for the lower Seyhan system in Turkey using dynamic programming. *Water international*, 30(4), 522-529.

Zavala, V.M., Constantinescu, E.M., Krause, T. and Anitescu, M. (2009). On-line economic optimization of energy systems using weather forecast information. *Journal of Process Control*, 19(10), 1725-1736.

Zhao, T., Cai, X. and Yang, D. (2011). Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Advances in Water Resources*, 34(4), 495-504.

Zhao, T., Yang, D., Cai, X., Zhao, J. and Wang, H. (2012). Identifying effective forecast horizon for real-time reservoir operation under a limited inflow forecast. *Water Resources Research*, 48(1).

Zhao, T., Zhao, J., Yang, D. and Wang, H. (2013). Generalized martingale model of the uncertainty evolution of streamflow forecasts. *Advances in Water Resources*, 57, 41-51.

Zhou, K., Doyle, J. C. and Glover, K. (1996). *Robust and optimal control* (Vol. 40, p. 146). New Jersey: Prentice hall.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Gökçen UYSAL
Yabancı Dil	: İngilizce, Almanca
Doğum Yeri ve Yılı	: Ankara, 1986
E-Posta	: gokcenuysal@gmail.com

İlgi Alanları: Su Kaynakları ve Havza Yönetimi, Hidroloji, Hidrolojik Modelleme, Kar Hidrolojisi, Yapay Sinir Ağları, CBS Uygulamaları, Kontrol Modelleri

Eğitim ve Meslek Geçmişi:

- Anadolu Üniversitesi, Araştırma Görevlisi (2012 – devam ediyor)
- Universitaet Duisburg Essen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Almanya, Doktora sırası Konuk Araştırmacı (2016 – 2017)
- Anadolu Üniversitesi, TÜBİTAK Projesi Burslu Öğrenci (2010 – 2012)
- Anadolu Üniversitesi, İnşaat Müh. ABD, Hidrolik, Yüksek Lisans (2009 – 2012)
- Anadolu Üniversitesi, İnşaat Müh., Lisans (2005 –2009)
- Ankara Gazi Anadolu Lisesi (2000 – 2004)

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanmış Makaleler

1. **Uysal, G.**, Alvarado-Montero, R., Schwanenberg, D. and Şensoy, A. (2017). Real-time flood control by tree-based model predictive control including forecast uncertainty (*değerlendirmede*).
2. **Uysal, G.**, Schwanenberg, D., Alvarado-Montero, R. and Şensoy, A. (2017). Short term optimal operation of water supply reservoir under flood control stress using model predictive control. *Water Resources Management*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1828-x.
3. **Uysal, G.**, Şensoy, A., Şorman, A.A., Akgün, T. and Gezgin, T. (2016). Basin/reservoir system integration for real time reservoir operation. *Water Resources Management*, 30(5), 1653-1668.
4. **Uysal, G.**, Şensoy, A. and Şorman, A.A. (2016). Improving daily streamflow forecasts in mountainous upper euphrates basin by multi-layer perceptron model with satellite snow products. *Journal of Hydrology*, 543, 630-650.

5. Şensoy, A., **Uysal, G.** and Şorman, A.A. (2016). Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models. *Journal of Flood Risk Management*. https://doi.org/10.1111/jfr3.12280.
6. **Uysal, G.**, Şorman, A.A. and Şensoy, A. (2016). Streamflow forecasting using different neural network models with satellite data for a snow dominated region in Turkey. *Procedia Engineering*, 154, 1185-1192. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.526.
7. **Uysal, G.**, Akkol, B., Topcu, M.I., Sensoy, A. and Schwanenberg, D. (2016). Comparison of different reservoir models for short term operation of flood management. *Procedia Engineering*, 154, 1385-1392. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.506.
8. Ertas, C., Akkol, B., Coskun, C., **Uysal, G.**, Sorman, A. A. and Sensoy, A. (2016). Evaluation of probabilistic streamflow forecasts based on EPS for a mountainous basin in Turkey. *Procedia Engineering*, 154, 490-497. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.543.
9. **Uysal, G.**, Sensoy, A., Sorman A.A., Akgun, T. and Gezgin, T. (2013). Evaluation of reservoir operation flexibility under variable hydrological conditions with user defined rules. *Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management*, pp.181-186, IAHS Publ. no: 362, ISSN: 0144-7815, ISBN: 978-1-907161-40-7, Andreas Schumann et al. (Eds.),
10. Şensoy, A. and **Uysal, G.** (2012). The value of snow depletion forecasting methods towards operational snowmelt runoff estimation using MODIS and numerical weather prediction data. *Water Resources Management*, 26(12), 3415-3440.

Ulusal veya Uluslararası Kongrelerde Yayımlanmış Bildiriler (son 5 yıl)

1. **Uysal, G.**, Şensoy, A., Schwanenberg, D. and Alvarodo-Montero, R. (2017). Short-term control of a storage hydropower under flood risk by multi-stage stochastic optimization. 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC) (*Tam metin, değerlendirmede*).
2. **Uysal, G.**, Schwanenberg, D., Alvarado Montero, R., Sensoy, A. and Arda Sorman, A. (2017). Baraj işletme kararları için rehber eğri çıkarılması. *IX. Ulusal Hidroloji Kongresi*'nde sunulan bildiri, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.

3. Uysal, G., Schwanenberg, D., Alvarado Montero, R., Sensoy, A. and Sorman, A. (2017). Short-term operation of multi-purpose reservoir using model predictive control. *EGU 2017 General Assembly Conference*'da sunulan poster (Vol. 19, p. 18793). Viyana, Avusturya.
4. Ertas, C., Sensoy, A., Akkol, B., Sorman, A., **Uysal, G.** and Çoskun, C. (2016). An assessment of melting season streamflow forecasts using eps for a snow dominated basin in Turkey. *EGU 2016 General Assembly Conference*, Abstracts (Vol. 18, p. 16627), Viyana, Avusturya.
5. **Uysal, G.**, Sorman, A. and Sensoy, A. (2016). Ensemble probabilistic streamflow generation using long-term MODIS snow product. *EGU General Assembly Conference*. (Vol. 18, p. 14527), Viyana, Avusturya. (Sunum)
6. G. Uysal, A. Şensoy, A.A. Şorman and Ertaş, M.C. (2015). Assessment of ensemble forecast uncertainty with multi-models for the mountainous upper Euphrates basin. *26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*'da sunulan bildiri. Prag, Çek Cumhuriyeti.
7. Şensoy, A., Şorman, A., Uysal, G., Gezgin, T. ve Akgün, T. (2014). Gerçek zamanlı baraj işletme akademi – uygulayıcı işbirliği: Yuvacık Barajı örneği. *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu*'nda sunulan bildiri. Elazığ: Fırat Üniversitesi.
8. Sensoy, A., Schwanenberg, D., Sorman, A., Akkol, B., Alvarado Montero, R., and **Uysal, G.** (2014). Assimilating H-SAF and MODIS snow cover data into the conceptual models HBV and SRM. *EGU General Assembly Conference*. (Vol. 16). Viyana, Avusturya.
9. **Uysal, G.**, Arda Sorman, A. and Sensoy, A. (2014). Contribution of MODIS derived snow cover satellite data into artificial neural network for streamflow estimation. *EGU General Assembly Conference*. (Vol. 16). Viyana, Avusturya.
10. **G., Uysal**, Şensoy, A., Şorman, A.A., Ertaş, M.C. and Roulin, E. (2014). Evaluation of reservoir model ıntegration with deterministic and probabilistic streamflow forecasts. *Proceeding of 11th International Conference on Hydroinformatic*s, New York: The City College of New York.
11. Şensoy, A., Şorman, A.A., **Uysal, G.**, Yavuz, Ö., Ergin, K., Akgün, T. ve Gezgin, T. (2013). Taşkın yönetimi için bütünleşik modeller ile karar destek sistemi oluşturulması: Yuvacık Havzası örneği, *III. Ulusal Taşkın Sempozyumu*, İstanbul.

12. Şorman, A.A., Ertaş, C., Akkol, B., Şensoy, A. and **Uysal, G.** (2013). Analysis of EPS based hydrological model performance for a mountainous basin in Turkey, *5th EGU Leonardo Conf, Facets of Uncertainty*'de sunulan poster. Kos Adası, Yunanistan.
13. **Uysal, G.**, Şensoy, A. and Şorman, A. (2013). Monitoring snow probability maps to improve runoff predictions in Upper Ephrates River Basin, Turkey. *5th EGU Leonardo Conf, Facets of Uncertainty*'de sunulan poster. Kos Adası, Yunanistan.
14. **Uysal, G.**, Sensoy, A., Sorman, A.A., Yavuz, O., Akgun, T. and Gezgin, T. (2013). Comparison of operational guide curves derived by a reservoir simulation model, *6th International Perspective on Water Resources and The Environment, ASCE EWRI IPWE 2013 Conference*, İzmir.
15. Şensoy, A., **Uysal, G.**, Yavuz, Ö., Şorman A. A., Gezgin, T. and Akgün, T., (2012). *Development of a decision support system for real time reservoir operation using numerical weather prediction data*. 10th International Congress on Advances in Civil Engineering. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
16. **Uysal, G.**, Yavuz, O., Sensoy, A., Sorman, A.A., Akgun, T. and Gezgin, T. (2012). Risk or shortage: developing a decision support system to reduce flood effects in Yuvacik Dam Reservoir, Turkey. *10th International Conference on Hydroinformatics*. Hamburg, Almanya.
17. Yavuz, O., **Uysal, G.**, Sensoy, A., Sorman, A. A., Akgun, T. and Gezgin, T. (2012). Using HEC-HMS as a decision support system to minimize the downstream flooding risk in Yuvacık Dam Basin. B*ALWOIS 2012 Conference on Water Observation and Information Systems*, Ohrid, Makedonya.
18. **Uysal, G.**, Sensoy, A., Yavuz, O., Sorman, A.A. and Gezgin, T. (2012) In the way of peacemaker guide curve between water supply and flood control for short term reservoir operation. *EGU 2012 General Assembly Conference*'de sunulan poster. Viyana, Avusturya.
19. Yavuz O.,Sensoy A.,**Uysal G.**,Sorman A.A. and Akgun T. (2012). Real time runoff forecasting using seasonal parameters in consideration of antecedent conditions. *EGU General Assembly 2012*'de sunulan poster, Viyana, Avusturya.

Tamamlanmış/Devam Eden Ulusal ve Uluslararası Projeler

1. AÜ-BAP, 1506F502 “Ensemble Tahminlerle Hazne Sisteminin Kısa Dönem Optimizasyonu”, 2015-2017 (Projede Araştırmacı)
2. Anadolu Üni.-BAP Yayın ve Araştırma Teşvik Projesi, 1404F149, “Kar Erimesine Bağlı Akımların Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi” 2015-2016, (Projede Araştırmacı)
3. TÜBİTAK (1001 Projesi) 113Y075, “Dağlık Fırat ve Seyhan Havzalarında EPS ve Uydu Verileri ile Operasyonel Hidrolojik Tahmin Sisteminin Geliştirilmesi”, 2013-2015 (Projede Bursiyer)
4. TÜBİTAK (1001 Projesi) 109Y218, “Havza ve Rezervuar Modellemesi ile Karar Destek Sistemi Oluşturarak Kısa ve Uzun Dönemli Baraj İşletmesi”, 2010-2012 (Projede Bursiyer)
5. TÜBİTAK (1001 Projesi) 108Y161, “Yukarı Fırat Havzasında, Arazi Ölçümleri, Uydu Teknolojileri, Hava Tahmin Verileri ve Hidrolojik Modeller Kullanılarak, Kar Potansiyelinin Dönemsel ve Akımların Günlük Tahmini”, 2008-2011 (Projede Bursiyer)
6. Anadolu Üni.-BAP, 1307F284 , “Hidrolojik Ensemble Tahmin Sisteminin Uygulanması”, 2013 – 2014 (Projede Araştırmacı)
7. Anadolu Üni.-BAP, Yayın ve Araştırma Teşvik Projesi, “Yukarı ve Orta Fırat Havzalarında Kar Olasılık Haritalarının Hidrolojik Modelleme Çalışmalarına Katkısının Değerlendirilmesi”, 2013-2014 (Projede Araştırmacı)
8. Anadolu Üni.-BAP, 1103F082 “Yuvacık Barajı'nın Rezervuar İşletmesi için HEC-ResSim Modeli Kullanılarak Karar Destek Sistemi Geliştirilmesi”, 2011–2012 (Projede Araştırmacı)

Ödülleri

1. Anadolu Üniversitesi – Makale Performans Ödülü (2016 yılında yayınlanan 3 adet SCI indeksli dergide makalelere ait performans ödülü)
2. TÜBİTAK 2214-A - Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı Destek, 2015 yılı 2. Dönem
3. Uluslararası Öğrenciler için Seyahat Burs Teşvik Ödülü, (Bildiri: Assessment of Short Term Flood Operation Strategies using Numerical Weather Prediction Data

in Yuvacık Dam Reservoir, Turkey), Amerikan Jeofizik Birliği (AGU) Güz Toplantısı, San Francisco, Kaliforniya, ABD, 5-9 Aralık, 2011.

4. Keith Runcorn Bilimsel Teşvik Ödülü (Bildiri: Forecasting Daily Discharge in the Upper Euphrates Basin Using Snowmelt Runoff Model with Estimated Snow Depletion Curves), Avrupa Yer Bilimleri Birliği (EGU) General Toplantı, Viyana, Avusturya, 3-8 Nisan, 2011
5. SU-PRO 2009 Yarışması Final Ödülü, (Proje: HEC-ResSim Modeli Kullanılarak Porsuk Barajı'nın Rezervuar Simülasyonu), Mühendis ve Mimarlar Grubu, İstanbul, 2010

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- Uluslararası Hidroloji Bilimleri Birliği (IAHS), 2012
- Avrupa Yer Bilimleri Birliği (EGU), 2011
- Amerikan Jeofizik Birliği (AGU), 2011
- İnşaat Mühendisleri Odası (İMO), 2009