KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERGENE NEHRİ İÇİN HİDROLİK MODEL VE KİRLETİCİ TAŞINIM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

İPEK TEZYAPAR

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERGENE NEHRİ İÇİN HİDROLİK MODEL VE KİRLETİCİ TAŞINIM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

İPEK TEZYAPAR

Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Aykan KARADEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Elçin KENTEL ERDOĞAN
Jüri Üyesi, Orta Doğu Teknik Üniveristesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Ergene Havzası'nda geniş bir drenaj ağı oluşturan Ergene Nehri suları arıtılmadan deşarj edilen evsel atıksular, tarım ve hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklı kirlilik ve bölgedeki çok çeşitli sanayi kuruluşlarının kontrolsüz deşarjının yarattığı kirlilik yükü baskısı sonucu IV. Sınıf su kalitesine düşmüştür. Ergene Havzasındaki su kütlelerinin A.B. Su Çerçeve Direktifi'ne uygun hale getirilmesi amacıyla Ergene Havzası Koruma Eylem Planı hazırlanmıştır. Eylem Planı kapsamında karar vericilere destek olması amacıyla TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı "Ergene Havzası Su Kalitesi Yönetimi İçin Kirletici Parmak İzine Bağlı Coğrafi Bilgi Sistemi Bazlı Karar Destek Sistemleri Geliştirilmesi" projesi gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında 115Y064 numaralı proje kapsamında Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model ve kirletici taşınım modelleri geliştirilmiştir. Modeller ile Ergene Havzasındaki güncel kirlilik durumu ortaya konmuştur. Ayrıca bir model uygulaması olarak Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesinin gerçekleşmesi durumunda Ergene Nehri'nde meydana gelecek değişiklikler incelenmiştir.

Tez çalışmam boyunca, bilgisini benden esirgemeyen, hoşgörüsü ve sabrıyla bana ilerlemem için yol gösteren, öğrencisi olmaktan onur duyduğum danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

115Y064 numaralı projenin yürütücüsü Dr.Öğr.Üyesi Ulaş TEZEL'e bana bu projede yer alma fırsatı verdiği için ve aynı projenin modelleme grubunda yer alan, bilgi ve deneyimlerinden yararlanma şansı yakaladığım Prof.Dr. Elçin KENTEL ERDOĞAN'a ve Prof.Dr. Tamer AYVAZ'a çok teşekkür ederim. Modelleme grubundaki arkadaşlarım Buket MESTA'ya ve Pınar Gökçe KARGI'ya tez çalışmama olan katkıları için ayrıca teşekkür ederim. Jüri üyem ve değerli hocam Prof.Dr. Aykan KARADEMİR'e katkıları için çok teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 115Y064 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Eğitimimde maddi ve manevi desteği çok büyük olan SANKO Holding Yönetim Kurulu Başkanı Zeki KONUKOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana maddi manevi her türlü desteği sunan geniş ailemin her bir üyesine başta annem Selma TEZYAPAR, babam Adnan TEZYAPAR ve kardeşim İrem TEZYAPAR olmak üzere sonsuz şükranlarımı sunarım. Can dostum Aura'ya teşekkür ederim. Her zaman düşüncelerini benimle paylaşan, bana inanan ve beni ilerlemek için yüreklendiren Jeofizik Yüksek Mühendisi Kadir Bahadır KARA'ya manevi destekleri ve varlığından ötürü teşekkür ederim.

Bana hür yaşama ve çalışma olanağı sundukları için Türkiye Cumhuriyeti'ne, Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e ve silah arkadaşlarına teşekkürü borç bilirim.

Haziran – 2019 İpek TEZYAPAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiii
GİRİŞ 1
1. NEHİR HİDROLİĞİ 6
1.1. Serbest Yüzey Akımları 6
1.2. Nehir Hidroliğinin Modellenmesi 10
1.3. SWMM'in Hidrolik Modeli 13
2. NEHİRLERDE KİRLETİCİ TAŞINIMI 18
2.1. Nehirde Kirletici Taşınımını Etkileyen Süreçler 18
2.2. Nehirler İçin Taşınım Modelleri 19
2.3. SWMM'in Kirletici Taşınım Modeli 21
3. ÇALIŞMA ALANININ TANITILMASI 23
3.1. Ergene Havzası'nın Genel Durumu 23
3.2. Ergene Havzası'nda Tarım ve Sanayi 25
4. ERGENE NEHRİ İÇİN HİDROLİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ 28
4.1. Hidrolik Model için Veri Setinin Oluşturulması 29
4.1.1. Havzanın sayısal yükseklik modelinin işlenmesi 29
4.1.2. Akım analizleri 33
4.1.3. Saha ölçümleri 36
4.1.4. Havzadaki yağış-akış ilişkisi (Uzun dönem hidrolojik modeller) 41
4.2. SWMM ile Hidrolik Model Oluşturulması 47
4.2.1. Kanal ağının oluşturulması 48
4.2.2. Kanal eğimlerinin hesaplanması 54
4.2.3. Kanal en kesitlerinin belirlenmesi 56
4.2.4. Kanalların pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi 60
4.2.4.1. Literatürden pürüzlülük katsayısı seçimi 64
4.2.4.2. Cowan yöntemi 65
4.2.4.3. Hız ve derinlik değerlerine göre kalibrasyon 66
4.3. Kararlı Durum Hidrolik Modelleri 67
4.3.1. Kasım 2017 Hidrolik Modeli 71
4.3.2. Şubat 2018 Hidrolik Modeli 78
4.4. Uzun Dönem Hidrolik Modeller 84
4.4.1. 71 Alt-havzalı Hidrolik Model 84
4.4.2. Nokta34 Hidrolik Modeli 89
5. ERGENE NEHRİ İÇİN KİRLETİCİ TAŞINIMI MODELİ GELİŞTİRİLMESİ 92
5.1. Yük Girdilerinin Belirlenmesi 95

5.2. Kararlı Durum Taşınım Modelleri 98
5.2.1. Kasım 2017 Taşınım Modeli 99
5.2.2. Şubat 2017 Taşınım Modeli 104
5.3. Uzun Dönem Taşınım Modelleri 109
5.3.1. 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli 110
5.3.2. Nokta34 Taşınım Model 112
6. MODEL UYGULAMASI: ERGENE DERİN DENİZ DEŞARJI PROJESİ'NİN ERGENE NEHRİ SU KALİTESİNE ETKİSİ 115
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 122
KAYNAKLAR 125
EKLER 129
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 135
ÖZGEÇMİŞ 136

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Serbest yüzey akımlarının sınıflandırılması 8
Şekil 1.2. Açık kanallarda görülen akım çeşitleri 9
Şekil 1.3. SWMM'de düğüm ve kanallardan oluşan bir iletim ağının gösterimi 14
Şekil 1.4. Kanalın bileşenlerinin gösterimi 15
Şekil 3.1. Ergene Havzası'nın konumu 23
Şekil 3.2. Ergene Havzası'nda nüfus dağılımı 24
Şekil 3.3. Meriç - Ergene Havzası'nda bulunan ilçelerin nüfus dağılımı 24
Şekil 3.4. Ergene Havzası içerisindeki endüstriyel tesislerin dağılımı 27
Şekil 4.1. Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellerin gösterilmesi 28
Şekil 4.2. Tif uzantılı sayısal yükseklik verisinin WMS ortamındaki görünümü 30
Şekil 4.3. SYM'nin ve olası su yollarının (mavi çizgiler) WMS ortamındaki görünümü. 31
Şekil 4.4. WMS yazılımı ile havza sınırı ve olası akış kolları belirleme adımları; a) Tif dosyasından elde edilen SYM, b) SYM üzerinde belirlenen olası akış kolları, c) seçilen havza çıkış noktasına göre oluşturulan akış kolları, d) akış kollarını kapsayan havza sınırları 31
Şekil 4.5. Ergene Havzası ve olası akış kolları 32
Şekil 4.6. Ergene Havzası üzerindeki ve çevresindeki AGİ'ler 33
Şekil 4.7. 1997-2002 su yılları için AGİ'lerdeki yıllık ortalama akımlar 35
Şekil 4.8. 1997-2002 su yılları için E01A012 No'lu Yenigörüce AGİ'deki yıllık ortalama akımlar 35
Şekil 4.9. 1997-2002 su yılları için AGİ'lerdeki aylık ortalama akımlar 35
Şekil 4.10. 1997-2002 su yılları için Yenigörüce AGİ'deki aylık ortalama akımlar 36
Şekil 4.11. Su kalitesi örneklemelerinin yapıldığı 75 nokta ve bu noktalar arasından debi-enkesit ölçümü yapılan 38 noktanın konumlarının gösterilmesi 37
Şekil 4.12. 39 numaralı ölçüm noktası için Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde alınan enkesitlerin gösterilmesi, a) Kasım 2017 döneminde 39 numaralı noktada nehrin sağ sahil görünümü, b) Şubat 2018 döneminde 39 numaralı noktada nehrin sağ sahil görünümü, c) Kasım 2017 döneminde 39 numaralı noktada nehrin önden görünümü, d) Şubat 2018 döneminde 39 numaralı noktada nehrin önden görünümü 38
Şekil 4.13. 39 numaralı ölçüm noktası için ADCP ile belirlenen akış enkesiti ve hız dağılımı 39
Şekil 4.14. Ana nehir kolları boyunca örnekleme noktalarındaki parametrelerin farklı ölçüm dönemlerindeki değerleri, a) debiler, b) maksimum su yükseklikleri, c) ortalama akış hızları 40
Şekil 4.15. 71 alt-havza sınırı ve alt-havza çıkış noktalarının gösterilmesi 42

Şekil 4.16. Ergene Havzası'nın mansap kısmının yakından görünümü 42
Şekil 4.17. Nokta34 Hidroloji Modeli'nde kullanılan 40 alt-havzanın dağılımı ve alt-havza çıkış noktaları 44
Şekil 4.18. Önemli kentsel ve endüstriyel atıksu deşarj noktaları 45
Şekil 4.19. Ergene Nehri olası akış kolları ve su toplama alanı 50 km^2'den büyük olan akarsu kollarının gösterimi 48
Şekil 4.20. EU-DEM ile elde edilen olası akarsu ağı üzerinde model ağının gösterilmesi 49
Şekil 4.21. Google Earth üzerinde çizilen akarsu kolları ve 75 ölçüm noktası 50
Şekil 4.22. EU-DEM ve Google Earth ile oluşturulan akarsu kollarının karşılaştırılması 50
Şekil 4.23. Google Earth yardımı ile belirlenen Ergene Havzası akarsu ağı ve modellenen akarsu ağı 51
Şekil 4.24. Modellenen nehir ağının SWMM arayüzünde görünümü 53
Şekil 4.25. Farklı kaynaklardan elde edilen su yüzeyi yüksekliği verilerinin ana nehir kolları boyunca karşılaştırılması, a) Ergene Deresi (151442. metre Çorlu Deresi ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (151442. metre Ergene Deresi ile birleşim noktasıdır.), c) Ergene Ana Kolu (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu ve 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 54
Şekil 4.26. O4 ve O28 düğümleri arasında kalan kanalların SWMM arayüzünde gösterilmesi 55
Şekil 4.27. 40 numaralı ölçüm noktası için ADCP ile belirlenen akış enkesiti ve hız dağılımı 56
Şekil 4.28. 40 numaralı ölçüm noktasının enkesitinin SWMM arayüzünde görünümü 57
Şekil 4.29. 40 numaralı ölçüm noktası için WMS arayüzünde enkesit çıkarılması işlemi 58
Şekil 4.30. 40 numaralı ölçüm noktası için uzun dönem modelinde kullanılan enkesit görüntüsü 60
Şekil 4.31. Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu için Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerine ait su yüzü profilleri (151442. m Çorlu Deresi ile Ergene Deresi'nin kavuşma noktasıdır.) 61
Şekil 4.32. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca ölçülmüş debi değerleri (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır) 68
Şekil 4.33. Kasım 2017 dönemi için oluşturulan Mekânsal Akış Şeması 69
Şekil 4.34. Kasım 2017 kararlı durum modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi 72
Şekil 4.35. Kasım 2017 Hidrolik Modeli için Excel Solver ile belirlenen akım dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 73

Şekil 4.36. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile belirlenen akımların Mekânsal Akış Şeması üzerinde gösterilmesi 74
Şekil 4.37. Kasım 2017 hidrolik modeli sonuçlarına göre akarsu ağında akım dağılımı haritası 75
Şekil 4.38. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarının saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) su derinliği, b) ortalama su hızı 75
Şekil 4.39. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre su derinliğin nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 76
Şekil 4.40. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre su hızının nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 77
Şekil 4.41. Şubat 2018 kararlı durum modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi 78
Şekil 4.42. Şubat 2018 modeli için Excel Solver ile belirlenen akım dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 79
Şekil 4.43. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile belirlenen akımların Mekânsal Akış Şeması üzerinde gösterilmesi 80
Şekil 4.44. Şubat 2018 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında akım dağılımı haritası 81
Şekil 4.45. Şubat 2018 Hidrolik Modeli sonuçlarının saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) su derinliği, b) ortalama su hızı 81
Şekil 4.46. Şubat 2018 hidrolik modeli sonuçlarına göre su derinliğin nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 82
Şekil 4.47. Şubat 2018 hidrolik modeli sonuçlarına göre su hızının nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.) 83
Şekil 4.48. 71 Alt-havzalı modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi 85
Şekil 4.49. Ergene Nehri üzerindeki 3 adet AGİ'deki akım ölçümleri ile 71 Alt-Havzalı Hidrolik Model sonuçlarının karşılaştırılması a) İnanlı AGİ b) Lüleburgaz AGİ c) Yenigörüce AGİ 87
Şekil 4.50. Gözlem noktası 34'te Kasım, Şubat ve Mayıs dönemi saha çalışmalarında ölçülmüş debiler ile 71 Alt-havzalı Hidrolik Model'in farklı su yılları için hesapladığı farklı aylara ait debilerin karşılaştırılması 88
Şekil 4.51. Nokta34 modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi 89

Şekil 4.52. Ergene Nehri üzerindeki 2 adet AGİ'deki akım ölçümleri ile Nokta34 Hidrolik Modeli sonuçlarının karşılaştırılması a) İnanlı AGİ b) Lüleburgaz AGİ 90
Şekil 4.53. Gözlem noktası 34'te Kasım, Şubat ve Mayıs dönemi saha çalışmalarında ölçülmüş debiler ile Nokta34 Hidrolik Modeli'nin 2015 su yılı için hesapladığı farklı aylara ait debilerin karşılaştırılması 91
Şekil 5.1. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca hexa(methoxymethyl)melamine (HMMM) kirletici konsantrasyonunun değişimi (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 93
Şekil 5.2. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca hexa(methoxymethyl)melamine kirletici akısının değişimi (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 94
Şekil 5.3. Kasım 2017 dönemi için oluşturulan Kütle Süreklilik Şeması 96
Şekil 5.4. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmamış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi 99
Şekil 5.5. Olası HMMM kaynak noktalarının harita üzerinde gösterimi 100
Şekil 5.6. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi 101
Şekil 5.7. Kasım 2017 Taşınım Modeli için Excel Solver ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük değerleri kullanılarak belirlenen yük dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 102
Şekil 5.8. Kasım 2017 Taşınım Modeli ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük dağılımı kullanılarak modellenen konsantrasyon değerlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 103
Şekil 5.9. Kasım 2017 Taşınım Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında HMMM konsantrasyonu dağılımı haritası; a) Yük girdi noktalarının sınırlandırılmadığı durum, b) Yük girdi noktalarının olası kirletici kaynaklarını hesaba katarak sınırlandırıldığı durum. 104
Şekil 5.10. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmamış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi 105
Şekil 5.11. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi 106

Şekil 5.12. Şubat 2018 Taşınım Modeli için Excel Solver ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük değerleri kullanılarak belirlenen yük dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. m Çorlu Deresi ile 0. m Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 107
Şekil 5.13. Şubat 2018 Taşınım Modeli ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük dağılımı kullanılarak modellenen konsantrasyon değerlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.) 108
Şekil 5.14. Şubat 2018 Taşınım Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında HMMM konsantrasyonu dağılımı haritası; a) Yük girdi noktalarının sınırlandırılmadığı durum, b) Yük girdi noktalarının olası kirletici kaynaklarını hesaba katarak sınırlandırıldığı durum. 109
Şekil 5.15. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin sonuçlarına göre 34 numaralı gözlem noktasında HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi 111
Şekil 5.16. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin 6 ayrı su yılı için hesapladığı aylık HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası) 112
Şekil 5.17. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin sonuçlarına göre 34 numaralı gözlem noktasında HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi 113
Şekil 5.18. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin hesapladığı aylık ortalama HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası) 114
Şekil 5.19. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin 2015 su yılı için hesapladığı aylık HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası) 114
Şekil 6.1. Ergene ve Çorlu derelerindeki önemli atıksu deşarjları ve derin deniz deşarjı hattının gösterimi 116
Şekil 6.2. Modellenmiş nehir-içi akım dağılımı haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (Ergene Deniz Deşarjı Projesi öncesi), b) EDDD modeli (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası) 117
Şekil 6.3. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi öncesi) ve EDDD (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası)

taşınım modellerinin hesapladığı aylık ortalama HMMM konsantrasyonları (34 numaralı gözlem noktası). 118
Şekil 6.4. Kasım 2017 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası) 119
Şekil 6.5. Şubat 2018 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (EDDD projesi sonrası) 119
Şekil 6.6. Mayıs 2018 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (EDDD projesi sonrası) 120

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. SWMM'in hidrolik model elemanları 13
Tablo 1.2. SWMM hidrolik modelinde dinamik dalga ve kinematik dalga analizlerinin özellikleri ve kısıtları 16
Tablo 3.1. İller bazında atıksu kaynaklarının sektörlere göre ayrımı 25
Tablo 4.1. Ergene Havzası üzerindeki ve çevresindeki AGİ'lere ait bilgiler 34
Tablo 4.2. Ölçüm dönemleri ve ölçülen parametreler 37
Tablo 4.3. 71 alt-havzalı hidrolojik modele ait kalibrasyon sonuçları 44
Tablo 4.4. Önemli bazı kentsel ve endüstriyel atıksuların deşarj noktalarına ait bilgiler 46
Tablo 4.5. Nokta34 hidroloji modeline ait kalibrasyon sonuçları 47
Tablo 4.6. Ölçüm noktaları için WMS arayüzü ile okunan sağ ve sol sahil eğimleri ile belirlenen ortalama nehir kolu eğimleri 59
Tablo 4.7. Kanallar için belirlenen farklı pürüzlülük katsayısı setleri 62
Tablo 4.8. Farklı yöntemler ile belirlenen Manning pürüzlülük katsayıları 63
Tablo 4.9. Cowan yöntemi ile pürüzlülük katsayısının hesaplanması için önerilen parametre değerleri 65
Tablo 4.10. Farklı manning pürüzlülük katsayıları ile çalıştırılan 71 Alt-Havzalı Hidrolik Model'in sonuçlarının AGİ'lerde gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması 85
Tablo 4.11. 71 Alt-havzalı Hidrolik Modele ait sonuçların AGİ'lerde gözlemlenen akım değerleri ile karşılaştırılması 88
Tablo 4.12. Nokta34 Hidrolik Modeli'ne ait sonuçların AGİ'lerde gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması 90
Tablo 5.1. Uzun dönem su kalitesi modellerinde kullanılan HMMM kirleticisi yük girdileri. 110
Tablo 5.2. Ölçülmüş HMMM konsantrasyonları (34 numaralı gözlem noktası) 110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Alan, (m^2)
B	: Kanal genişliği, (m)
C	: Konsantrasyon, (µg/L)
F_r	: Froude sayısı
g	: Yer çekimi ivmesi, (m/sn^2)
L	: Karakteristik uzunluk
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
R	: Hidrolik yarıçap, (m)
R_e	: Reynolds sayısı
S_0	: Kanal eğimi, (m/m)
S_f	: Enerji çizgisi eğimi, (m/m)
V	: Hacim, (m^3)
V_{ort}	: Ortalama akış hızı, (m/s)
v	: Kinematik viskozite, (m^2/s)
y	: Ortalama akış derinliği, (m)
z	: Akar kot, (m)
Q	: Debi, (m^3/s)

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ADA	: Ani Değişen Akım
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
ÇŞB	: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
EDDD	: Ergene Derin Deniz Deşarj
EPA	: Environmental Protection Agency
KDA	: Kademeli Değişen Akım
NSE	: Nash–Sutcliffe Efficiency
RMSE	: Root Mean Square Error (Hataların Ortalama Karekökü)
SÇD	: Su Çerçeve Direktifi
SWMM	: Storm Water Management Model
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ERGENE NEHRİ İÇİN HİDROLİK MODEL VE KİRLETİCİ TAŞINIM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, Ergene Nehri için hidrolik model ve kirletici taşınım modeli geliştirilmesidir. Çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı "Ergene Havzası Su Kalitesi Yönetimi İçin Kirletici Parmak İzine Bağlı Coğrafi Bilgi Sistemi Bazlı Karar Destek Sistemleri Geliştirilmesi" başlıklı projenin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kararlı durum ve dinamik benzeşimler için hidrolik ve su kalitesi modelleri oluşturulmuştur. Su kalitesi modelleri ile nehir-içi taşınım benzeşimlerinde hekza(metoksimetil)melamin (HMMM) kirleticisi izleyici kimyasal olarak seçilmiştir. Matematiksel modelleme aracı olarak A.B.D. Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilmiş olan Storm Water Management Model (SWMM) kullanılmıştır. SWMM ile modelleme işlemine başlamadan önce çalışma sahası için gerekli olan verilerin tümü coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamında derlenmiş ve Ergene Havzası'nı kapsayan bir sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak havza sınırları, akış kolları ve kanal boy kesitleri belirlenmiştir. Kanalların hidrolik özellikleri gözlem verileri kullanılarak belirlenmiştir. Bu aşamanın ardından modellere ait debi ve kirletici yükleri için mekânsal takip şemaları oluşturulmuştur. Bu şemalar kullanılarak farklı noktalardan akarsu ağına giren su ve kirletici miktarları belirlenmiştir. Bu süreçlerin ardından oluşturulan SWMM modelleri çalıştırılmış ve modellenen nehir kolları için debi ve konsantrasyon dağılımı haritaları üretilerek elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan modeller yardımı ile sınırlı sayıdaki gözlem verisi kullanılarak gözlem noktalarının dışında kalan akarsu kollarında farklı zamanlardaki debi ve konsantrasyon değerleri tahmin edilmiştir. Son olarak bir model uygulaması ile Ergene Derin Deniz Deşarjı projesinin gerçekleşmesinin Ergene Nehri'ne olası etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ergene Nehri, Hidrolik Model, Nehir Suyu Kalitesi, Taşınım Modeli, SWMM.

DEVELOPMENT OF HYDRAULIC AND POLLUTANT TRANSPORT MODELS FOR ERGENE RIVER

ABSTRACT

The objective of this thesis study is the development of hydraulic and pollutant transport models for Ergene River. This study was conducted as a part of the project titled "Development of a Geographical Information System Based Decision-Making Tool for Water Quality Management of Ergene Watershed Using Pollutant Fingerprints", which was funded by TUBITAK under project number 115Y064. The study includes the development of hydraulic and water quality models for steady-state and hydraulic simulations. The pollutant hexa(methoxymethyl)melamine (HMMM) was chosen as the tracer chemical for the pollutant transport simulations using the water quality models. Storm Water Management Model (SWMM) developed by U.S. Environmental Protection Agency (EPA) was used as the mathematical modeling tool. Before starting the modeling process with SWMM, all the data required were compiled through geographic information systems (GIS) tools, and a digital elevation model covering the Ergene Basin was generated. Using this model, basin boundaries, flow channels and channel slopes were identified. Hydraulic properties of the channels were determined by using site data. Then, spatial continuity diagrams were created to represent flow and pollutant loads in the models. Using these diagrams, the amount of water and pollutant entering the river network from different locations were determined. SWMM models were run and the results were analyzed by generating flow and concentration distribution maps for the modeled river channels. With the help of the developed models, it was possible to estimate the flow and concentration values at different time at the river sections that did not contain any observation points, using a limited number of observation data. Finally, possible effects of Ergene Deep Sea Discharge project on Ergene River was investigated by a model application.

Keywords: Ergene River, Hydraulic Model, River Water Quality, Transport Model, SWMM.

GİRİŞ

Kontrolsüz kentleşme, sürdürülebilirlik kavramından uzak sanayileşme ve denetleme mekanizmasındaki eksiklikler tabiatın dengesinin geri dönüşü mümkün olmayacak ölçüde bozulmasına sebep olmaktadır. 19. Yüzyılda Sanayi Devrimi ile ivmelenen insanın ihtiyaçlarından daha fazlasını elde etme isteği canlı türlerini yok etmekte, doğal kaynakları kirletip tüketmekte, iklimleri değiştirmektedir. Öyle ki bazı bilim insanları tarafından insan faaliyetlerinin sonucu olarak gezegenimizin Antroposen (Foley ve diğ., 2013; Zalasiewicz ve diğ., 2015) olarak adlandırılan yeni bir jeolojik çağa geçtiği öne sürülmektedir. Türkiye'nin kuzey batısında yer alan Ergene Havzası'ndaki yüzey suları da antropojenik etkiler sonucu oluşan kirlilik yükünün baskısı altındadır. Ergene Havzası'nda geniş bir drenaj ağı oluşturan Ergene Nehri suları arıtılmadan deşarj edilen evsel atıksular, tarım ve hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklı kirlilik ve bölgedeki çok çeşitli sanayi kuruluşlarının kontrolsüz deşarjının yarattığı kirlilik yükü baskısı sonucu IV. Sınıf su kalitesine düşmüştür. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2015) bölgedeki endüstriyel tesisler tarafından nehre neredeyse doğal debisinin 3 katı kadar atıksu deşarj edildiğini bildirmiştir.

İnsan faaliyetlerinin doğal denge üzerindeki etkisi bu derece yüksekken elimizdeki kaynakların sürdürülebilir ve etkin şekilde kullanılması için yapılacak çalışmalar büyük önem ifade etmektedir. Bu çalışmalardan biri Ergene Havzası'ndaki su kütlelerinin A.B. Su Çerçeve Direktifi'ne uygun hale getirilmesi amacıyla 2011'de başlayan ve 2040'a kadar sürmesi planlanan Ergene Havzası Koruma Eylem Planı'dır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008). Eylem Planı kapsamında yapılması hedeflenen faaliyetlerin devamlılığını sağlamak ve sonuçlarını incelemek için karar vericilere destek olması amacıyla TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı "Ergene Havzası Su Kalitesi Yönetimi İçin Kirletici Parmak İzine Bağlı Coğrafi Bilgi Sistemi Bazlı Karar Destek Sistemleri Geliştirilmesi" projesi gerçekleştirilmiştir. 2016-2019 yılları arasında gerçekleştirilen projenin amacı Ergene Nehri'ndeki güncel kirliliği mikrokirletici düzeyinde belirlemek, mevcut kirleticilerin kaynaklarını tespit ederek doğa ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini

anlamaktır. Bu amaç doğrultusunda Ergene Nehri üzerinde belirli aralıklarla 75 noktada mevsimsel olarak su kalitesi ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde konvansiyonel kirleticilerin yanında 250 adet mikrokirletici ölçülerek bu kirleticilerin kaynakları belirlenmiş ve kaynaklara özel kirletici parmak izleri çıkartılmıştır. Var olan coğrafi bilgiler ve proje kapsamında elde edilen ölçümler kullanılarak Ergene Nehri'ne özel bütünleşik bir kirletici taşınım modeli geliştirilmiştir. Elde edilen tüm veriler ve oluşturulan modeller yardımı ile python ortamında FEnCY olarak isimlendirilen bir su kalitesi yönetimi karar destek sistemi oluşturulmuştur (URL-9).

Bu tez çalışmasında 115Y064 numaralı proje kapsamında Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model ve kirletici taşınım modelleri geliştirilmiştir. Ergene Nehri ve önemli yan kolları Ergene Havzası boyunca 338 km uzunluğunda bir drenaj hattı oluşturmaktadır. Bu büyüklükte bir sistemde kısa aralıklarla sürekli ölçüm yaparak izleme çalışmalarını sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirmek mümkün değildir. Bir çevresel sistem için gerçekleştirilecek iyileştirme ve yönetim çalışmaları için uzun zaman ve yüksek maliyet gerekir. Bu kapsamda bir çevresel sistem için matematiksel modellerin kullanılması sistemin mevcut durumunun ortaya konması, planlanan yönetim senaryolarının olası sonuçlarının değerlendirilmesi ve iyileştirme faaliyetlerinin etkileri gözlemleme imkânı sağlamaktadır. Çalışılan sistem için ilgili modeller bir kez olabildiğince doğru şekilde kurulduğunda insan gücü ve maliyet açısından çok ciddi tasarruf sağlamaktadır. Bir nehir sistemi için geliştirilen hidrolik modeller ile nehirde istenilen noktadaki akım seviyesi, derinlik ve hız gibi hidrolik parametrelerin zamanla değişimi hesaplanabilmektedir. Kalibrasyonu yapılarak yeterliliği kanıtlanmış modeller ile başlangıca göre çok daha az gözlem verisi kullanarak herhangi bir zaman için ve nehrin herhangi bir bölümü için hidrolik durum hesaplanabilir. Ergene Nehri'ne özgü geliştirilen hidrolik modeller ile hem kirletici taşınım modellerine alt yapı sağlanmış hem de kısıtlı saha ölçümleri kullanılarak gözlem noktalarının dışında kalan akarsu kollarındaki debi, derinlik, hız ve konsantrasyon değerleri tahmin edilmiştir. Bu tez çalışmasında EPA tarafından geliştirilen SWMM (Rossman, 2015) yazılımı kanal içi akışı dinamik ve kinematik dalga yöntemleri ile veya kararlı durum varsayımıyla çözme imkânı sağladığından tercih edilmiştir. Düzensiz kanal şekli de dahil bir çok kanal şekil seçeneği sunan

SWMM ayrıca hidrolojik model altyapısına da sahip olup WMS, BASINS gibi coğrafi bilgi sistemi yazılımları ile bağlantılı olması avantajına sahiptir.

Nehir ağı boyunca su kalitesinin her zaman ve her noktada izlenebilmesi mümkün değildir. Bu yüzden, gözlem ağlarını destekleyen kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesi kirletici taşınımının zamansal ve mekânsal takibini mümkün kılmaktadırlar. Bir hidrolik model altyapısı üzerine kurulan kirletici taşınım modelleri gözlem noktaları dışında kalan noktalar için konsantrasyon tahmini yapabilmeyi, kirletici kaynakları ve kaynakların olası konumları hakkında fikir yürütebilmeyi ve kirlilik durumunu nehir ağı boyunca irdelemeyi sağlamaktadırlar. Nehir-içi taşınım modelleri adveksiyon, dispersiyon ve bozunum gibi temel taşınım süreçlerinin benzeşimini yapabilmektedirler. Bu tez çalışmasında Ergene Nehri'ne özgü ve 115Y064 numaralı proje kapsamında ölçülen kirleticileri modelleyebilecek genel bir kirletici taşınım modeli geliştirilmiştir. Taşınım modeli olarak hidrolik model ile bütünlük sağlaması bakımından yine SWMM yazılımı tercih edilmiştir. Modellenecek kirletici olarak 115Y064 numaralı proje kapsamında Ergene Nehri'ne özgü kirletici kaynakları için parmak izi kirleticisi olarak belirlenen hekza(metoksimetil)melamin (HMMM) organik kirleticisi izleyici (tracer) seçilmiştir. Geliştirilen taşınım modelleri yardımı ile HMMM kirleticisinin nehir boyunca taşınımı incelenebilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında Ergene Nehri'ne özgü kararlı ve dinamik (uzun dönem) durumda çalışan hidrolik ve kirletici taşınım modelleri geliştirilmiştir. Kararlı durum modelleri ölçüm anının benzeşimini yapmak amacıyla geliştirilmiş olup; Kasım 2017 hidrolik modeli ve Şubat 2018 hidrolik modeli ile bu modellerin altyapısı üzerinde geliştirilen Kasım 2017 taşınım modeli ve Şubat 2018 taşınım modellerinden oluşmaktadırlar. Uzun dönem modeller ise dinamik modellerdirler; ve 1997-2002 su yılları akım değerlerinin kullanıldığı 71 Alt-havzalı Hidrolik Model ve 71 alt-havzalı taşınım modeli ile 2015 su yılı akımlarının kullanıldığı Nokta 34 hidrolik modeli ve Nokta 34 taşınım modelinden oluşmaktadırlar. Modellerde kullanılan akım ve yük verileri saha ölçümlerindeki hatalardan ve kısa süreli dalgalanmaların etkisinden arındırılmak üzere Excel Çözücü Eklentisi kullanılarak optimize edilmişlerdir. Uzun dönem modellerde kullanılan akım verileri ise 115Y064 numaralı proje kapsamında geliştirilen hidrolojik model çıktılarıdır.

Son olarak Ergene Derin Deniz Deşarjı projesinin (Türkiye Barolar Birliği, 2015) nehre etkisini incelemek amacıyla en güncel hidrolojik veriler ve önemli atıksu deşarjları kullanılarak oluşturulan Nokta34 hidrolik ve taşınım modellerinin temel alındığı Ergene Derin Deniz Deşarjı (EDDD) modeli geliştirilmiştir. Bu modelle projesi sonrası Ergene Deresi ve Çorlu Deresi'nde HMMM kirleticisi konsantrasyonlarının büyük ölçüde azaldığı ancak nehir-içi akımlarının çok azaldığı kurak yaz dönemlerinde Ergene Nehri ana kolunun üst kısımlarında yüksek konsantrasyonların görülmeye devam edebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tez çalışması ile nehir-içi kirletici konsantrasyonlarının tahmininde ve Ergene Derin Deniz Deşarjı gibi büyük projelerin olası çıktılarının değerlendirilmesinde bütünleşik hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesinin kritik önem taşıdığı gösterilmiştir.

Bölüm 1'de nehir hidroliği hakkında altyapı bilgisine ve tez çalışmasında hidrolik model olarak kullanılan SWMM yazılımının özellikleri ile modelin kullandığı hidrolik öteleme yöntemlerine yer verilmiştir.

Bölüm 2'de nehirlerde kirletici taşınım süreçlerine yer verilmiştir. Bu süreçlerin benzeşiminin çeşitli kirletici taşınım modelleri ve tez çalışmasında kullanılan SWMM yazılımı tarafından nasıl yapıldığı anlatılmaktadır.

Bölüm 3'de çalışma alanı olarak seçilen Ergene Nehri ve yer aldığı Ergene Havzası'nın genel durumu hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 4'de Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model oluşturmak için mevcut verilerin ne şekilde kullanıldığı, hidrolik modelin temel parametreleri olan kanal ağının, eğimlerinin, enkesitlerinin ve pürüzlülük katsayılarının belirlenme aşamaları detaylı şekilde anlatılmaktadır. Modellerde kullanılan ölçümlerin alınma anının benzeşimini yapmak amacı ile geliştirilen ve kararlı durum modelleri olarak adlandırılan Kasım 2017 Hidrolik Modelinin ve Şubat 2018 Hidrolik Modelinin geliştirilme aşamaları ve model sonuçları bu bölümde yer almaktadır. Uzun dönem modelleri olan 1996-2002 su yılları akım değerleri ile kalibre edilmiş 71 Alt-havzalı Hidrolik Model ve 2015 su yılı akım değerleri ile kalibre edilmiş Nokta 34 hidrolik modelinin geliştirilme aşamaları ve model sonuçları yine bu bölümde anlatılmaktadır.

Bölüm 5'de Ergene Nehri'ne özgü geliştirilen ve Bölüm 4'de anlatılan hidrolik modellerin altyapısı üzerine kurulan aynı isimli kirletici taşınım modellerinin geliştirilme aşamaları yer almaktadır. Yine bu bölümde modellerde kullanılan HMMM kirleticisinin yüklerin belirlenmesi için uygulanan optimizasyon yöntemi anlatılmaktadır.

Bölüm 6'da Ergene Havzası'ndaki mevcut kirlilik bilgisi ve geliştirilen taşınım modelleri kullanılarak Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi'nin Ergene Nehri su kalitesine etkisinin incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen model uygulaması yer almaktadır.

1. NEHİR HİDROLİĞİ

1.1. Serbest Yüzey Akımları

Sıvılar bir yerden bir yere doğal ya da insan yapımı kanallar ile taşınırlar. Bu kanallar kesitlerinin üst kısımlarının açık ya da kapalı olması durumlarına göre, sırasıyla açık kanallar ya da kapalı kanallar (borular) olarak adlandırılırlar. Dereler, ırmaklar, nehirler, haliçler açık kanallara örnek olarak verilebilirler; tüneller ve borular kapalı kanallardır. Açık ya da kapalı kanallarda serbest yüzey alanına sahip akıma serbest yüzeyli akım ya da açık kanal akımı denir. Eğer serbest yüzey yoksa ve kanal tam dolu akıyorsa o akıma boru akımı ya da basınçlı akım denir (Chaudhry, 2008). Serbest yüzeyli akımlarda sadece atmosfer basıncı etkilidir ve akımı yerçekimi kuvveti sağlar.

Bu tez çalışmasında Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model ve kirletici taşınım modeli geliştirilmiştir. Nehirler açık kanal akımına sahip sistemler olduğundan bu bölüm ile nehirlerde görülen serbest yüzey akımları hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Serbest yüzey akımları; sürtünmenin etkisi, ağırlık kuvvetlerinin etkisi, zaman, mekan ve akım çizgileri kriterlerine göre'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir. Sınıflandırmanın nasıl ve hangi temellere dayanarak yapılığı ilerleyen kısımlarda özetlenmektedir. Bu bölümdeki literatür bilgilerinin yazılmasında çoğunluğu Chaudhry (2008)'e ait olmakla birlikte Chanson (2004), Henderson (1966), French (1986), Öziş (1983) ve Strum (2001)'a ait eserlerden faydalanılmıştır.

Serbest yüzeyli akımlar, sürtünme kuvvetlerinin etkisine göre lâminer ve türbülanslı akım olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sıvı parçacıklarının belirli bir hat buyunca düzenli bir şekilde hareket etmesi ile oluşan akım lâminer akım olarak adlandırılır. Sıvı parçacıklarının zamana veya mekâna göre sabit olmayan düzensiz yollarda hareket etmesiyle oluşan akım ise türbülanslı akım olarak adlandırılır. Akımın laminer veya türbülanslı olup olmadığını viskoz ve atalet kuvvetlerinin göreceli büyüklüğü belirler. Akıntı, viskoz kuvvetlerin egemen olması durumunda laminerdir, atalet kuvvetleri baskın olduğunda ise akış türbülanslıdır.

Viskoz ve atalet kuvvetlerinin oranı olarak ifade edilen birimsiz Reynolds sayısı Denklem (1.1) ile ifade edilir;

$$R_e = \frac{V_{ort} L}{\nu} \tag{1.1}$$

Burada R_e Reynolds sayısı, V_{ort} ortalama akış hızı (m/s), L karakteristik uzunluk (m) ve ν sıvının kinematik viskozitesidir (m^2/s). Serbest yüzey akışlarında karakteristik uzunluk olarak hidrolik derinlik ya da hidrolik yarıçap kullanılabilir. Hidrolik derinlik, akış alanının üst su yüzey genişliğine bölünmesi olarak tanımlanır. Hidrolik yarıçap, akış alanının ıslak çevreye oranı olarak tanımlanır. Karakteristik uzunluğun hidrolik yarıçap olarak alındığı serbest yüzey akışlarında Reynolds sayısı yaklaşık 600 olduğunda laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş oluşur (Chaudhry, 2008). Doğal çevrede laminer akış oldukça nadir görülür.

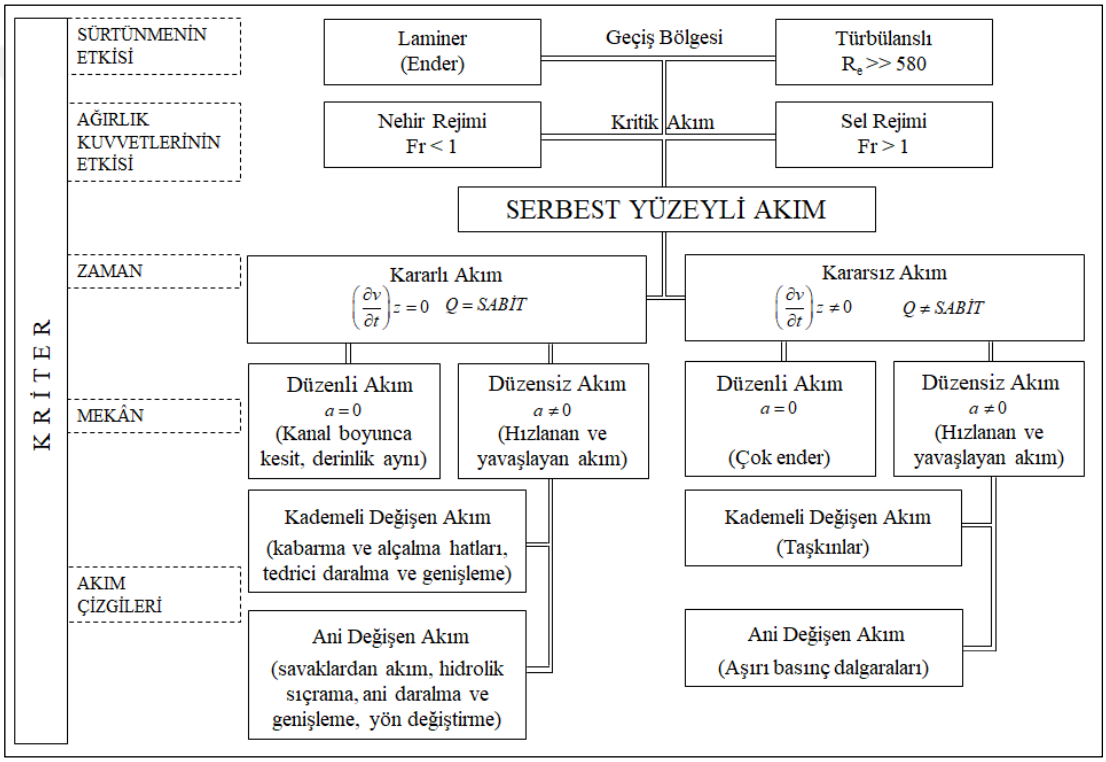
Ağırlık kuvvetlerinin etkisine göre ise akım kritik altı, kritik ve kritik üstü olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma için yer çekimi ve atalet kuvvetlerini oranlayan birimsiz Froude sayısı kullanılır. Dikdörtgen bir kanal için Froude sayısı Denklem (1.2) ile ifade edilir;

$$F_r = \frac{V_{ort}}{\sqrt{gy}} \tag{1.2}$$

Burada F_r Froude sayısı, V_{ort} ortalama akış hızı (m/s), g yerçekimi ivmesi (m/s^2) ve y akış derinliğidir (m). Froude sayısına bağlı olarak; $F_r<1$ ise akım kritik altı, $F_r=1$ ise akım kritik, $F_r>1$ ise akım kritik üstüdür. Kritik altı akım; nehir rejimi, yüksek akım, durgun akım olarak adlandırılır. Kritik üstü akım sel rejimi alçak akım, hızlı akım olarak adlandırılır.

Sınıflandırma zaman kriterine göre yapıldığında, akım kararlı akım ve kararsız akım olarak ikiye ayrılır. Eğer akış hızı belirli bir konumda zamana bağlı olarak değişmiyorsa, bu akıma kararlı akım denir. Ancak verilen konumda akış hızı zamana bağlı olarak değişiyorsa o zaman bu akım kararsız akım olarak adlandırılır. Böylelikle $\partial V/\partial t$ kararlı akımda sıfıra eşittir. İki ve üç boyutlu kararlı akımlarda ivme, hızın tüm bileşenleri için sıfırdır.

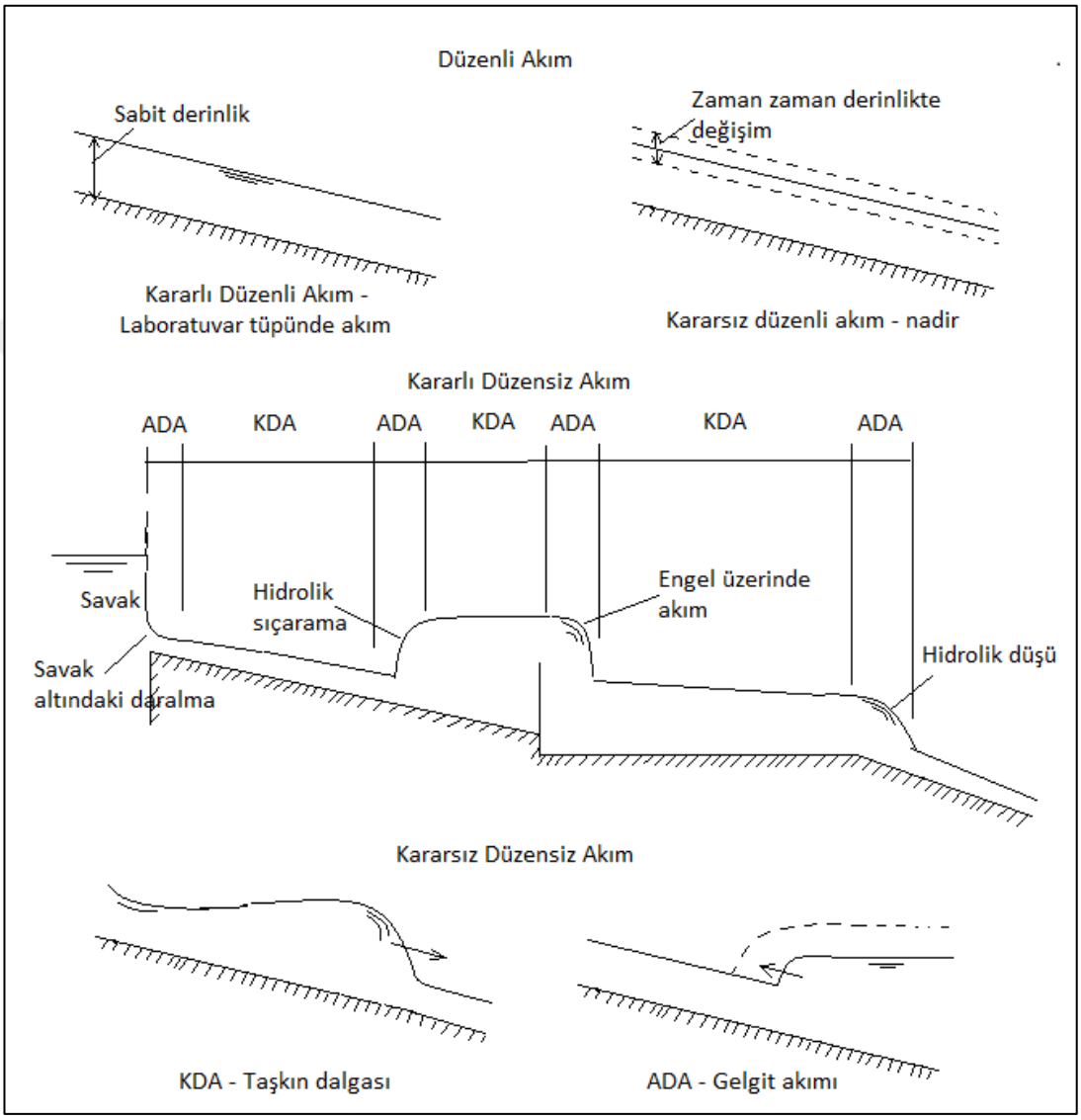
Sınıflandırma konum baz alınarak yapıldığında, akım düzenli (üniform) akım ve düzensiz (değişken) akım olarak ikiye ayrılır. Eğer akış hızı belirli bir zamanda, bir kanalın uzunluğu boyunca değişmiyorsa bu akım düzenli akımdır. Bununla birlikte akış hızı verilen zamanda kanal boyunca mesafeye göre değişiyorsa bu akım düzensiz akım ya da değişken akım olarak adlandırılır. Düzensiz akımlar da kendi içinde kademeli (yavaş) değişen akım (KDA) ve ani değişen akım (ADA) olarak ikiye ayrılır. Akım derinliği kanal boyunca yavaş bir hızda değişirse bu KDA olarak adlandırılır. Eğer akım derinliği kısa bir mesafede önemli ölçüde değişirse bu akıma ADA denir (Şekil 1.2).



Şekil 1.1. Serbest yüzey akımlarının sınıflandırılması (Öziş, 1983)

Burada dikkat edilmesi gereken kararlı ve kararsız akışlar belirli bir konumda zamandaki değişime göre karakterize edilirken, düzenli ve düzensiz akımların belirli bir zamanda konuma göre karakterize edildiğidir. Yani kararlı ve kararsız akımlar, düzenli ya da düzensiz akım olarak ikiye ayrılabilir (Şekil 1.1). Kararlı düzenli akımlar, zamanla debi değişiminin olmadığı ve kanal boyunca derinliğin sabit olduğu durumlarda görülür. Kararlı düzensiz akımlar ise zamanla debide değişim olmadığı ancak kanal boyunca su derinliğinin değiştiği durumlardır, bu akım kararlı KDA ve kararlı ADA olarak ikiye ayrılır. Kararlı KDA'ya örnek olarak kabarma ve alçalma

hatları ya da kanal boyunca kesitte kademeli daralma ve genişleme olduğu durumlarda oluşacak akış verilebilir. Burada derinlik yavaş yavaş değişmektedir. Kararlı ADA'lar ise savaklardan akım, hidrolik sıçrama, kanal kesitinde ani daralma ve genişleme olduğu durumlarda görülür (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Açık kanallarda görülen akım çeşitleri (Chow, 1959)

Kararsız düzenli akımlar, yani derinliğin zamanla değiştiği ancak su yüzeyinin kanal tabanına paralel kaldığı akım türü doğada pek görülmemektedir. Kararsız düzensiz akımlar ise hem zamana bağlı olarak hem de kanal boyunca mesafe ile su derinliğinin değiştiği akım çeşididir. Kararsız düzensiz akımlar da KDA ve ADA olarak ikiye ayrılabilir. Kararsız KDA'lara taşkınlar örnek verilebilir. Gelgit akımı ise kararsız ADA'ya bir örnektir (Şekil 1.2). Nehir-içi su akışının genellikle kararsız

kademeli değişen akım kategorisinde olması beklenir. Bu tez çalışmasında Ergene Nehri'nin modellenmesinde kullanılan SWMM yazılımı, açık kanal içerisindeki suyun hidroliğini kararlı düzensiz akım ve kararsız düzensiz akım kabulü ile çözme olanağı sağlar.

1.2. Nehir Hidroliğinin Modellenmesi

Bir kanal ya da boru boyunca kararsız düzensiz yüzey akışı St. Venant denklemleri olarak bilinen süreklilik ve momentum korunumu denklemleri ile ifade edilir. Bu denklemlerin eşzamanlı çözümü kanal ağı boyunca su seviyelerinin ve su hızının mekânsal ve zamansal değişimini hesaplar. Bir boyutlu akış için süreklilik ve momentum denklemleri sırasıyla Denklem (1.3) ve (1.4)'de verilmiştir (Chaudhry, 2008);

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{1.3}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{V^2}{2g}+y\right)=g(S_0-S_f) \tag{1.4}$$

Burada A akış enkesit alanı (m^2), Q debi (m^3/sn), V hız (m/sn), y kanaldaki su derinliği (m), g yerçekimi ivmesidir (m/sn^2), x mesafe (m), t zaman (sn), S_f enerji çizgisi eğimi (birim uzunluk başına yük kaybı, m/m) ve S_0 kanalın eğimidir (m/m).

St. Venant denklemlerinin türetilmesinde aşağıdaki temel kabuller yapılmıştır (Chaudhry, 2008);

1. Akış bir boyutludur,
2. Basınç hidrostatiktir,
3. Kanal yatağı eğimi çok küçüktür ($\cos\alpha = 1$),
4. Sınır sürtünmesi kararlı akış gibi temsil edilebilir.

Dalga denklemlerinin türetilmesinin detayları için Chaudhry (2008), Henderson (1966), Cunge ve diğ. (1980) ve French (1986)'e ait eserler incelenebilir.

Kararlı düzenli akışı modellemek için kullanılan Manning denklemi SI birim sistemi ile Denklem (1.5) olarak ifade edilebilir (Henderson, 1966);

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \tag{1.5}$$

Burada V akış hızıdır (m/s) ve *Q*/A' ya eşittir, R akış enkesitinin hidrolik yarıçapıdır (m^2/m), n manning pürüzlülük katsayısıdır ve birimsizdir. Burada 1 dönüşüm faktörüdür ve birimi $m^{1/3}$/s'dir. Denklem İngiliz birim sisteminde kullanıldığında 1 yerine 1.49 (ft^3/s) değeri kullanılır. Böylece manning n değeri birimsiz olur.

Denklem enerji çizgisi eğimi S_f'i yalnız bırakacak şekilde yeniden düzenlendiğinde Denklem (1.6) elde edilir. Hız teriminin mutlak değer içerisinde olması S_f'i yönlü bir nicelik yapar (çünkü debi pozitif ya da negatif olabilir), böylece sürtünme kuvveti her zaman akışa ters olur.

$$S_f = n^2 \frac{Q|V|}{AR^{4/3}} \tag{1.6}$$

Denklem sisteminin (Denklem (1.3) ve (1.4)) tamamının çözümü dinamik dalga modeli olarak ifade edilir. Dinamik dalga modeli ile St. Venant akış denklemlerinin tüm formu çözüldüğünden teorik olarak en doğru sonuç elde edilir. Bu analiz yöntemi ile kanal depolaması, kabarma etkileri, giriş/çıkış kayıpları, menfez akışı, ters akış ve basınçlı akış hesaplanabilir.

Denklem (1.3) ve (1.4)'de verilen korunum denklemlerinin eş zamanlı çözülmesi için sayısal yöntemlere ihtiyaç vardır. Açık kanal akımına sahip nehirlerin matematiksel olarak modellenmesi için çeşitli yazılımlar mevcuttur. Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği tarafından geliştirilen HEC-RAS bu yazılımlardan biridir. HEC-RAS karışık akım rejimine sahip sistemlere ait su yüzeyi profillerini hem enerji hem de momentum denklemlerinin sayısal çözümlemesini yaparak belirleme olanağı sunar. Yüzey akışına ilaveten su kalitesini de çözen modellerden biri olan EPD-RIV1 (Matin ve diğ., 2002) HEC-RAS gibi 1 boyutlu akış için momentum korunum denklemini çözer. İki model de düzensiz kanal şekli tanımlamaya imkân sağlar. Ambrose ve diğ. (2009) tarafından geliştirilen WASP modelinin son versiyonu versiyon 8 kanal şeklini düzensiz tanımlama imkânı sağlamasa da akışı dinamik dalga modeli formunda çözer.

Pelletier ve diğ. (2006) tarafından geliştirilen QUAL2Kw modelinin son versiyonu, Versiyon 6, St. Venant denklemlerinin basitleştirilmiş formunu çözer (URL-8). Bu form kinematik dalga modeli olarak adlandırılır. Bu modelde dinamik dalga modelinde dikkate alınan basınçlı akış, ters akış ve ters su etkileri çözüme dahil edilmez. Denklem (1.4)'ün sol tarafında yer alan terimlerin ihmal edilirse Denklem (1.7) elde edilir;

$$S_0 = S_f \tag{1.7}$$

Kanal taban eğimi ile sürtünme eğiminin birbirine eşit olması, yer çekimi kaynaklı akışkan hareketinin sürtünme direnci ile dengelenmiş olduğunu gösterir. Sürtünme eğimini temsil etmek için kararlı ve düzgün akış için Manning denkleminin Denklem (1.8)'de verilen formunun kullanılması debi (Q) ve akış alanı (A) arasındaki ilişkiyi gösterir;

$$Q = \frac{AR^{2/3}\sqrt{S_0}}{n} \tag{1.8}$$

Nehir suyu kalitesini modellemek amacıyla geliştirilmiş yazılımlardan bir diğeri olan AQUATOX (Park ve diğ., 2008), akımı daha basit şekilde modeller. Akımı karalı ve düzenli akım kabul ederek dikdörtgen şeklinde bir kanal için Manning denklemini Denklem (1.9) formunda çözer;

$$Y = \left(\frac{Qn}{\sqrt{S_0}B} \right)^{3/5} \tag{1.9}$$

Burada Y ortalama derinlik (m) ve B kanal genişliğidir (m).

EPA tarafından geliştirilen ve bu tez çalışmasında hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesinde kullanılan SWMM (Rossman, 2015) yazılımı kanal içi akışı dinamik ve kinematik dalga yöntemleri ile veya kararlı durum varsayımıyla çözme imkânı sağlamaktadır. Düzensiz kanal şekli de dahil bir çok kanal şekil seçeneği sunan SWMM ayrıca hidrolojik model altyapısına da sahip olup WMS, BASINS gibi coğrafi bilgi sistemi yazılımları ile bağlantılıdır. SWMM'in hidrolik modeli ile ilgili detaylar bir sonraki bölümde verilmiştir.

1.3. SWMM'in Hidrolik Modeli

Bu kısımda verilen bilgiler için SWMM'in hidrolik referans dokümanından faydalanılmıştır (Rossman, 2015). SWMM'de bir iletim ağı düğümlerle birbirine bağlanan kanallar olarak modellenir. Akışlar düğümler aracılığı ile sisteme verilir ve kanallar boyunca taşınır. SWMM modelinde çeşitli düğüm elemanları ve kanal yapıları mevcuttur. Tablo 1.1'de bu hidrolik elemanların isimleri ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. SWMM'in hidrolik model elemanları

Hidrolik Eleman	**Özellikleri**
Bağlantı	İletim sistemindeki kanalları ihmal edilebilir bir depolama hacmi ile birbirlerine bağlayan bir nokta (düğüm, çıkış düğümü ya da depolama düğümü).
Çıkış	Suyun bilinen su yüzeyi yükseltisine sahip bir alıcıya boşaltıldığı, nakil sisteminin akış aşağı uç noktası.
Bölücü	Giriş akımını iki çıkış kanalına ayıran bir nokta.
Depolama Birimi	Suyun birikmesini sağlayan gölet, su birikintisi veya bölme.
İletim Hattı	Suyun bir düğümden başka bir düğüme taşındığı iletim hattı (boru, kanal, pompa hattı, akım düzenleme hattı).
Pompa	Suyun hidrolik düşüsünü yükselten bir cihaz.
Düzenleyici	Taşıyıcı sistemin iki düğümü arasındaki akışı yönlendirmek veya düzenlemek için kullanılan bir savak, delik veya çıkış.

Düğümler, iletim hatlarının başında ve sonunda bulunurlar. Fiziksel olarak, kanalizasyon sistemindeki bacaları, doğal yüzeyli kanalların veya boruların birleşimini temsil edebilirler. Bir düğüm tanıtmak için gereken temel parametreler aşağıda belirtilmiştir;

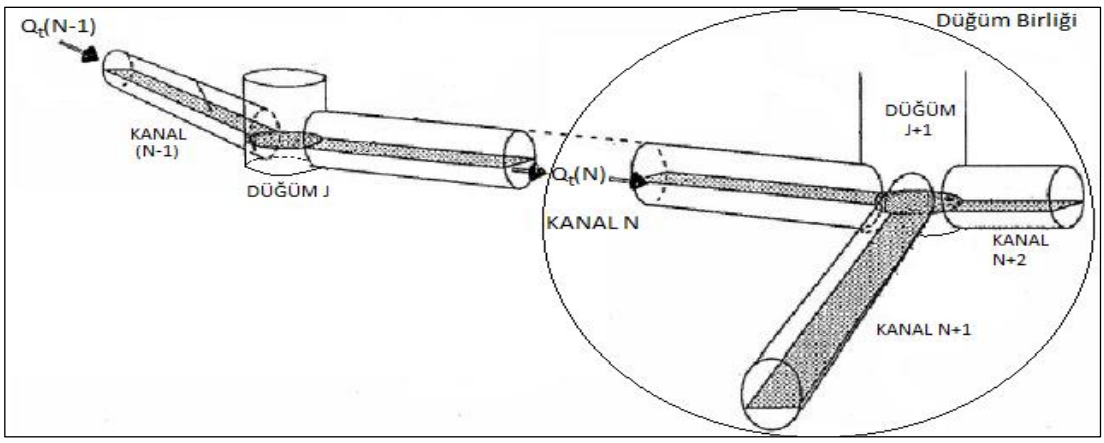
- Kanal akar kotu
- Akar kot ile yer yüzeyi arasındaki yükseklik

Ayrıca modellenecek kanal sistemine yapılacak tüm su ve kirletici girişleri zaman serileri ya da sabit değerler olarak düğümlerden yapılmak zorundadır.

SWMM'de suyun bir düğümden diğer bir düğüme taşındığı iletim hatları kanallar ya da borular olabilir. Kanal enkesit geometrileri; standart açık kanal şekilleri (dikdörtgen, trapez, üçgen, parabolik), kapalı kanal şekilleri (dairesel, dikdörtgen, elipsoid ve yay) olarak seçilebileceği gibi kapalı boru ya da doğal açık kanal olarak da tanımlanabilir. Bir kanal için gerekli giriş parametreleri şunlardır:

- Giriş ve çıkış düğümlerinin isimleri
- Giriş ve çıkış düğümündeki akar kot ya da ayarlanabilir yükseklik
- Kanal uzunluğu
- Manning n pürüzlülük katsayısı
- Enkesit şekli ve boyutları.

SWMM'de bir akarsu ağı düğümlerle birbirine bağlanan açık kanallar olarak modellenebilir. Çeşitli kaynaklardan gelen akımlar bağlantı elemanı olan düğümlerden sisteme girer ve açık kanallar boyunca dinamik dalga modeli veya kinematik dalga modeli olmak üzere iki farklı hidrolik analiz yöntemi ile ötelenirler. SWMM'de düğümler ve açık kanallar şeklinde tanımlanan iletim hatlarının birbirlerine olan bağlantısı düğüm birliği (node assembly) olarak adlandırılır. Düğüm birliği iletim ağı üzerindeki bir düğümü ve bu düğüme bağlanan kanalların yarısını kapsar. Böylelikle düğümlerde su yüzeyi yüksekliği sürekliliği sağlanmış olur (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. SWMM'de düğüm ve kanallardan oluşan bir iletim ağının gösterimi (Rossman, 2015)

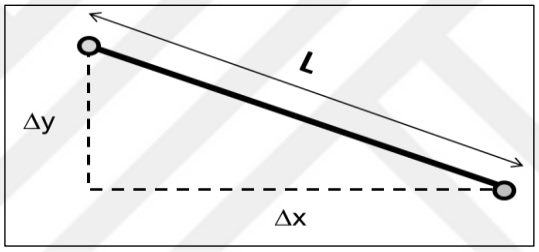
SWMM hidrolik hesaplamalarında bir kanalın eğimini kullanır. Eğim, kanalın doğrudan değiştirilebilir özelliği değildir, kanalın giriş ve çıkış düğümlerinin akar kot değerlerinden Denklem (1.10) ve Denklem (1.11) ile hesaplanmaktadır;

$$\Delta x = \sqrt{L^2 - \Delta y^2} \tag{1.10}$$

burada L kanal uzunluğu, Δy kanalın giriş ve çıkış düğümlerindeki akar kot farkı ve Δx kanalın giriş ve çıkış düğümleri arasındaki yatay mesafedir (Şekil 1.4). Buradan kanal eğimi S_0;

$$S_0 = \Delta y / \Delta x \tag{1.11}$$

Denklem (1.11) ile hesaplanır.



Şekil 1.4. Kanalın bileşenlerinin gösterimi

SWMM, kanal içindeki akış hızını, su derinliği ve kanal yatağının enerji çizgisi eğimi ile ilişkilendirmek için Manning denklemini kullanır (1.5). Bu nedenle kanalın yüzeyinin pürüzlülük özelliklerini temsil eden bir Manning pürüzlülük katsayısının belirlenmesi gerekir.

SWMM'nin hidrolik modeli, belirlenen benzeşim periyodu boyunca her zaman adımı için her düğümdeki su seviyesini, her kanaldaki akış hızını ve akış derinliğini belirlemek için kanal boyunca kademeli olarak değişen kararsız akış denklemlerini çözer. SWMM'de karasız ve düzensiz akışkanın hidroliği, St. Venant denklemleri (Denklem (1.3) ve (1.4)) ile temsil edilir. Bu denklem sisteminin çözümü ile birlikte her bir kanal ve düğüm boyunca akış derinliği sürekliliği sağlanarak su hızının mekânsal ve zamansal değişimi hesaplanır.

SWMM'de bu denklemleri çözmek için dinamik dalga ve kinematik dalga yöntemlerinden biri kullanılabilir. Dinamik dalga analizi çok karmaşık (dallanmış ve

düğümlenmiş) ağlara uygulanabilmektedir, ancak sayısal çözüm için küçük zaman adımları seçilmesi önerilmektedir. Bu denklem setini düğümler ve kanallarda eş zamanlı çözmek için SWMM sayısal yöntem olarak sonlu farklar yaklaşımını ve geri örtük Euler methodunu kullanır.

Kinematik dalga analizi, her bir kanal süreklilik denklemini ve momentum denkleminin basitleştirilmiş formunu çözer. Dinamik dalga analizinde dikkate alınan basınçlı akış, ters akış ve ters su etkileri bu analiz yönteminde çözüme dahil edilmez. Yüksek hızla sığ akım oluşturan dik eğimli (S_0> 0.001) kanallar için uygun bir yöntemdir. Dinamik dalga analizinde olduğu gibi küçük zaman adımlarına ihtiyaç duyulmaz. SWMM, kinematik dalga analizi ile modellemek için süreklilik denklemini Wendroff sonlu farklar şemasına göre yeniden ifade ederek (Smith, 1985) Bisection Newton Raphson sayısal yöntemi (Press ve diğ., 1992) ile çözer. Tablo 1.2'de dinamik dalga ve kinematik dalga analizleri için mevcut kısıtlar verilmektedir.

Tablo 1.2. SWMM hidrolik modelinde dinamik dalga ve kinematik dalga analizlerinin özellikleri ve kısıtları

Özellik	**Dinamik Dalga**	**Kinematik Dalga**
Ağ topolojisi	Dallanmış ve düğümlenmiş	Sadece dallanmış
Akış bölünmesi	Evet	Akış bölücü düğümleri ile sağlanır
Akım düzenleyiciler	Evet	Sadece depolama düğümlerinden
Pompalama	Evet	Sadece depolama düğümlerinden
Akar kot düzenlenmesi	Evet	İhmal edilir
Göllenme	Evet	Evet
Negatif eğim	Evet	Hayır
Yanal sızıntı	Evet	Evet
Buharlaşma	Evet	Evet
Minör kayıplar	Evet	Hayır
Menfez analizi	Evet	Hayır
Hidrograf zayıflatma	Evet	Hayır
Kabarma etkisi	Evet	Hayır
Aşırı yükleme/basınçlanma	Evet	Hayır
Ters akış	Evet	Hayır
Gelgit etkisi	Evet	Hayır

SWMM ayrıca, düzgün ve kararlı akım analizi seçeneği sunar. Kararlı akım analizinde giriş hidrografı hiçbir yayılıma ve gecikmeye uğramadan kanalın akış aşağı ucuna taşınır. Manning denklemi, akış oranını akış alanı (veya derinlik) ile ilişkilendirmek için kullanılır. Kinematik dalga yöntemi ile aynı sınırlamalara tabidir. Serbest yüzey dalgası yayılımının dinamikleri ihmal edildiğinden uzun süreli sürekli benzeşim periyotlarında kaba ön analizi için uygulanabilir.

2. NEHİRLERDE KİRLETİCİ TAŞINIMI

2.1. Nehirde Kirletici Taşınımını Etkileyen Süreçler

Nehirde kirletici taşınımını etkileyen en önemli mekanizmalar adveksiyon, difüzyon, dispersiyon ve çeşitli kayıp (bozunum, volatilizasyon vd.) mekanizmalarıdır. Adveksiyon, hareketli bir akışkan kütlesinin içerisindeki bir maddenin, akışkan kütlesine ait hız ile akışkanın hareket yönünde taşınması olarak ifade edilebilir. Bir boyutlu adveksiyon denklemi Denklem (2.1)'de verilmiştir (Mihelcic, 1999);

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u\frac{\partial C}{\partial x} \tag{2.1}$$

Burada C konsantrasyon (ML^{-3}), u yatay hız (LT^{-1}), x yatay mesafe (L) ve t zamandır (T). Konsantrasyon zamanın ve mesafenin bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Bir diğer taşınım mekanizması olan difüzyon, akışkan kütlesi içerisindeki maddenin konsantrasyonun yüksek olduğu yerden düşük olan yere hareketi olarak tanımlanabilir. Difüzyon, çözelti içindeki moleküllerin rastgele hareketleri sonucu oluşan dağılım ve karışım sürecidir. Dispersiyon ise, türbülans akımları etkisiyle oluşan hız farkları sonucu maddenin ortamda seyrelerek ve karışarak yayılmasıdır (Mihelcic, 1999). Difüzyon ve dispersiyon mekanizmaları Fick'in birinci kanununa dayanan Denklem (2.2) ile ortak bir matematiksel formda ifade edilmektedir;

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2.2}$$

Burada D yatay dispersiyon-difüzyon katsayısıdır (L^2/T). Nehirlerde türbülanslı akımların yaygınlığı dolayısı ile moleküler difüzyonun taşınıma etkisi dispersiyonun etkisine göre çok daha düşük olacağından, moleküler difüzyon ihmal edilebilir ve D değeri dispersiyon katsayısına eşit kabul edilebilir (Mihelcic, 1999).

Denklem (2.1) ve (2.2) kütlenin korunumuna dayanan, bir kanal (boru ya da doğal kanal) boyunca çözünmüş maddelerin taşınımı denkleminin temelini oluşturur. Bu denklem Eşitlik (2.3)'de verilen 1 boyutlu adveksiyon-dispersiyon denklemdir;

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{-\frac{\partial (uC)}{\partial x}}_{\text{adveksiyon}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x} \right)}_{\text{dispersiyon}} + \underbrace{r(C)}_{\text{diğer}} \tag{2.3}$$

D yatay dispersiyon katsayısı (L^2/T), r(C) reaksiyon katsayısıdır ($ML^{-3}T^{-1}$). Burada reaksiyon terimi biyokimyasal bozunum ve volatilizasyon gibi diğer kayıp süreçlerini ifade etmektedir.

2.2. Nehirler İçin Taşınım Modelleri

Ergene Havzası'nda büyük bir drenaj ağı oluşturan Ergene Nehri ve yan kolları bölgedeki evsel ve endüstriyel deşarjların (noktasal kaynak) ve tarımsal kirliliğin (yayılı kaynak) baskısı altındadır. Bu kirliliğin doğru ve sürdürülebilir şekilde izlenmesi su yönetimi açısından bir gerekliliktir. Ancak havza bazında su kalitesinin her zaman ve her noktada izlenebilmesi mümkün değildir. Bu yüzden, gözlem ağlarını destekleyerek su kalitesinin zamansal ve mekânsal takibini mümkün kılmak amacıyla su kalitesi modelleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Bilinen ilk model Streeter ve Phelps (1925) tarafından Ohio nehri için geliştirilen çözünmüş oksijen modelidir. Nehirlerde çözünmüş oksijen odaklı araştırmalar takip eden yıllarda gelişerek devam etmiştir (Theriault, 1927; Fair, 1939). 1960'ların başında bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile ampirik modeller yerini matematiksel modellere bırakmaya başlamıştır. 1970'li yıllarda ötrofikasyon sorununa neden olan besi elementlerini de dikkate alan modellerler geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde su içerisindeki canlı yaşamın da dikkate alındığı modeller mevcuttur (Thomann, 1963; McBride ve Rutherford, 1984; Thomann ve Muller, 1987).

Su kalitesi modelleri özellikle son on yılda kullanıcı dostu yazılımlar şeklinde ulaşılabilir durumdadır. Her model diğerlerine kıyasla güçlü ve zayıf özelliklere sahiptir. Modelci çalışma alanının durumuna, veri gereksinimine ve en önemlisi modellenmek istenen kirleticinin özelliğine göre model seçimi yapmalıdır. Besi elementlerinin ve organik kimyasalların sudaki biyolojik yaşamda ve sedimentte

akıbetini modellemek için Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilen AQUATOX (Park ve diğ., 2008) modeli kullanılabilir. Ancak yazılım metal modellemeye izin vermez. USEPA'nın talebi üzerine Ohio Devlet Üniversitesi tarafından geliştirilen One-Dimensional Riverine Hydrodynamic and Water Quality Model (EPD-RIV1) nehir hidroliğini ve çözünmüş oksijen, demir, mangan, koliform bakteri akıbetini modellemek mümkündür ancak sediment süreçleri modellenmez (Matin ve diğ., 2002). Birçok çalışma alanına uygulanan QUAL serisinin Pelletier ve diğ. (2006) tarafından geliştirilen son versiyonu QUAL2Kw ile sıcaklık, ışık ve patojen benzeşimi yapmak mümkündür. Ayrıca alg ölümü de modellenmektedir. Yüksek karmaşıklığa sahip olan QUAL2K algoritmasına dayanan daha basit bir model model WASP'tır. (Ambrose ve diğ., 2009) Bu model su kalitesi için EUTRO, toksik kirleticiler için TOXI isimli alt modellere sahiptir. Nütrient, çözünmüş oksijen, fitoplankton, alg, koliform bakteri, pesitisit, ağır metal ve daha birçok su kalitesi parametresini modelleme imkânı sağlamaktadır. Bu modeller nehir içi taşınıma odaklanan modeller olup, kirletici taşınımının tüm havza suları ile olan etkileşimini dikkate alan havza ölçekli modeller de mevcuttur.

Havza ölçekli modeller akarsuların yanı sıra havza ölçeğinde oluşacak yağış akış ilişkisini çözümlemeyi ve arazi kullanımındaki değişiklikleri yönetmeyi sağlar. Bu modeller hidroloji, hidrolik ve taşınım süreçlerini bir arada işleyerek havzanın bütünlüğünü korumayı sağlar. Bu modellerden en yaygın olanı SWAT (Neitsch ve diğ., 2011) ve HSPF'dir (Bicknell ve diğ., 1997). Bu modeller içerisinde AQUATOX, QUAL ve WASP gibi su kalitesi modellerini barındırır. HSPF genel hidrolojiye odaklı bir model iken SWAT özellikle tarımsal amaçlı arazi kullanımının havzadaki su kütlelerine etkisini incelemek amacı ile geliştirilmiş bir modeldir. İki modelin karşılaştırıldığı bazı çalışmalar model kalibrasyonunun SWAT'a kıyasla HSPF modeli ile daha zor olduğunu belirtmekte, kısıtlı veriye sahip olunan çalışma alanları için SWAT modelinin kullanılmasının önermektedir (Im ve diğ., 2004; Saleh ve Du, 2004; Srivastava, 2007).

Son dönemlerde havza ölçekli modellerinin coğrafi bilgi sistemi (CBS) yazılımları ile birleşimi sonucu ortaya çıkan CBS tabanlı çatı platformlar kullanılmaktadır. EPA tarafından geliştirilen BASINS (Better Assessment Science Integrating Point & Non-

point Sources) havza çapında su kalitesi yönetimi için çok sayıda hidrolojik modelleme aracını CBS ile bir araya getiren bir sistemdir (URL-5). BASINS havza modellemesi için gerekli veri setlerini çevrimiçi olarak ulusal veri tabanlarından (A.B.D. özelinde) derleyebilmekte ve seçilen modellere uygun formatta düzenleyebilmektedir. BASINS HSPF, SWAT ve SWMM gibi havza modellerini bünyesinde barındırmaktadır. CBS tabanlı havza modelleme platformlarından biri de A.B.D. merkezli Aquaveo firması tarafından geliştirilmiş olan Watershed Modeling System (WMS) (URL-4) yazılımdır. İlgili yazılım kullanılarak pek çok farklı hidrolojik, hidrolik ve su kalitesi modeline ait girdi dosyaları oluşturulabilmekte ve bu modellere ait sonuçlar detaylı olarak WMS ortamında değerlendirilebilmektedir. WMS'in bünyesinde bulundurduğu hidrolik ve hidrolojik modellerden bazıları HSPF, HEC-1, HEC-HMS ve SWMM'dir. Bu tez çalışması kapsamında WMS yazılımının CBS araçlarından faydalanılarak Ergene Nehrine özgü hidrolik ve su kalitesi modellerinin altyapıları oluşturulmuştur.

BASINS ve WMS sistemine dahil modellerden biri olan SWMM havza çapında yağış-akış ilişkisini ve kirletici taşınımını modelleyebilen bir yazılım (Rossman, 2015) olup tez çalışması kapsamında hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. SWMM ABD'nin Georgia eyaletinde bulunan Altamaha Havzası'nda yağış-akış ve kirletici taşınımı süreçlerinin modellenmesi için başarıyla uygulanmıştır (Telci, 2012). SWMM, HSPF ve SWAT modellerinden daha az model girdisine ihtiyaç duyarken atmosfer, yer yüzeyi, yeraltı ve nehir-içi kompartmanlarındaki su taşınımı süreçlerini modelleyebilmektedir. Ayrıca SWMM modelinde doğal kanalların düzensiz, karmaşık enkesitlerini ifade etmek mümkün iken SWAT modelinde nehir-içi akış için sadece trapez enkesiti tanımlanabilmektedir (Neitsch ve diğ., 2011; Rossman, 2015). Bu özelliklerinden dolayı bu tez kapsamında nehir-içi akışın ve kirletici taşınımı süreçlerinin modellenmesinde SWMM kullanılmıştır.

2.3. SWMM'in Kirletici Taşınım Modeli

Önceki bölümde anlatılan su kalitesi modellerinden SWMM, AQUATOX, WASP, EPD RIV1 ve QUAL2Kw modelleri mekanistik modeller olup kütle korunumu denklemini çözerler. SWMM taşınım denkleminin basitleştirilmiş halini tam

karışımlı reaktör varsayımı ile çözer. Bu tam karışımlı reaktörlerle ifade edilen sistemler "kutu modelleri" ya da "seri tanklar" olarak adlandırılırlar (Rossman, 2015). EPA tarafından geliştirilmiş bir diğer model olan WASP'da aynı seri tanklar yaklaşımını kullanmaktadır (Ambrose ve diğ., 2009). Bu yaklaşımda düğümlerle birbirlerine bağlanan kanallar bir tam karışımlı reaktör olarak kabul edilir. Tam karışımlı reaktörlerde kütlenin korunumu denklemi Denklem (2.4) ile ifade edilir;

$$\frac{d(VC)}{dt} = C_{in}Q_{in} - CQ_{out} - Vr(C) \tag{2.4}$$

Burada V reaktör hacmi (L^3), C reaktör içerisindeki konsantrasyon (ML^{-3}), C_{in} reaktöre giren konsantrasyon (ML^{-3}), Q_{in} reaktöre giren akım (L^3T^{-1}), Q_{out} reaktörden çıkan akım (L^3T^{-1}), r(C) reaksiyon sonucu bozunan kirletici miktarıdır (MT^{-1}). Bu korunum denklemi SWMM'de bir kanala uygulandığında ve zamanda süreksizleştirildiğinde Denklem (2.5)'e dönüşür.

$$C(t+\Delta t) = \left[C(t)V(t)e^{-K_1\Delta t} + C_{in}Q_{in}\Delta t \right] / (V(t) + Q_{in}\Delta t) \tag{2.5}$$

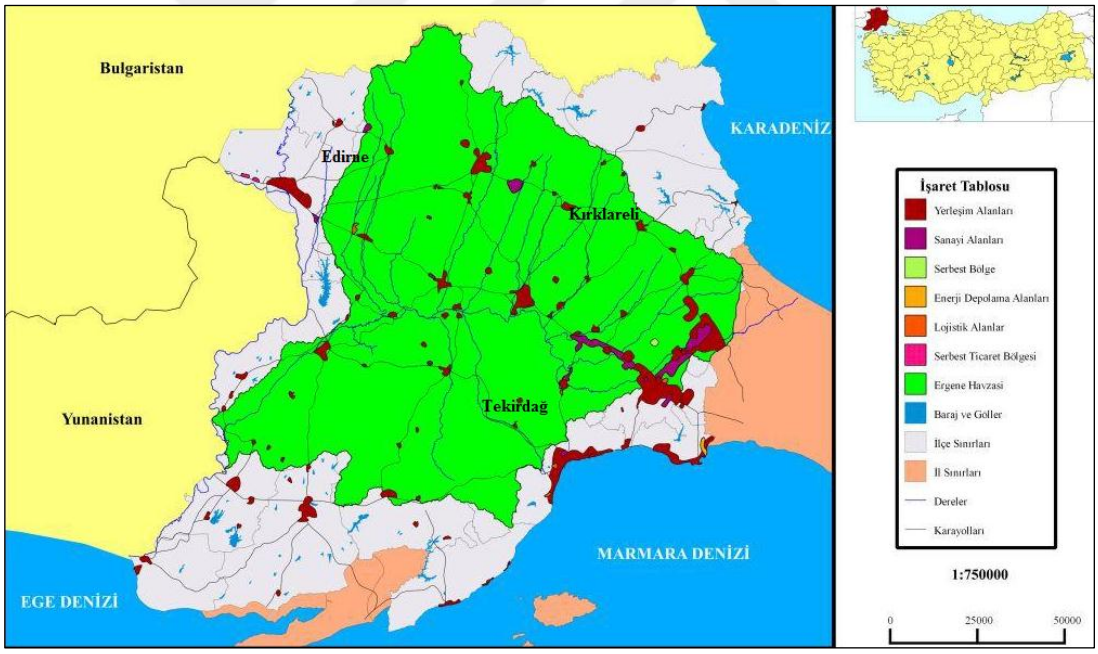
Burada C_{in}, Q_{in} ve Q_{out} hesaplama adımı, t'den Δt'ye kadar sabittir. V hesaplama adımı boyunca kanal ortalama bir hacim değeridir. K_1 1. Dereceden dönüşüm sabitidir (T^{-1}). Kanallar için debi ve hacim Bölüm 1.3'de anlatılan, SWMM'in seçilen hidrolik öteleme yöntemine göre hesaplanmış durumdadır.

3. ÇALIŞMA ALANININ TANITILMASI

Bu tez çalışmasında Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model ve kirletici taşınım modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde Ergene Havzası kısaca tanıtılmaktadır.

3.1. Ergene Havzası'nın Genel Durumu

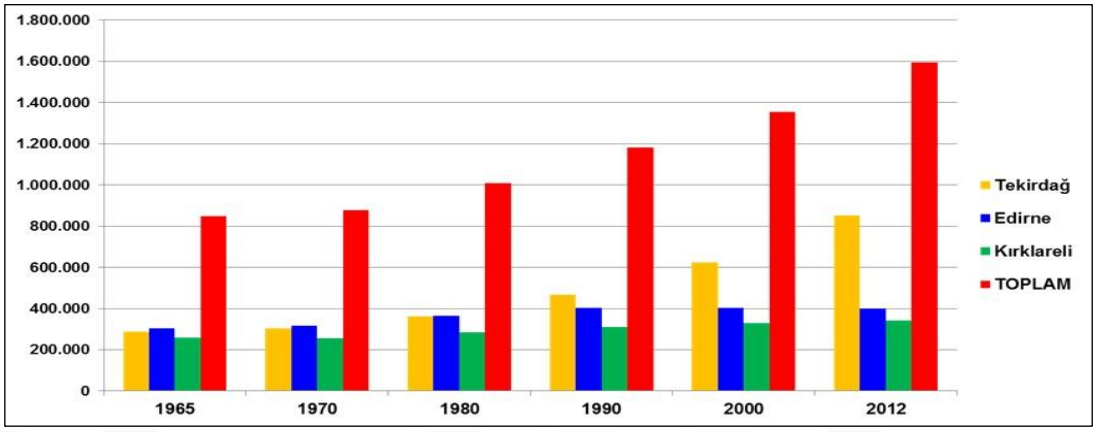
Ergene Havzası, Trakya Bölgesi'nin ortalarında yer almakta olup sınırları Kuzey Marmara Havzası, Meriç Havzası ve Bulgaristan'dır. Tekirdağ İl'inin %69'u, Kırklareli İl'inin % 70'i, Edirne İl'inin % 89'u ve İstanbul İl'inin %4'ü Ergene Havzası sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 3.1) (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016).



Şekil 3.1. Ergene Havzası'nın konumu (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016)

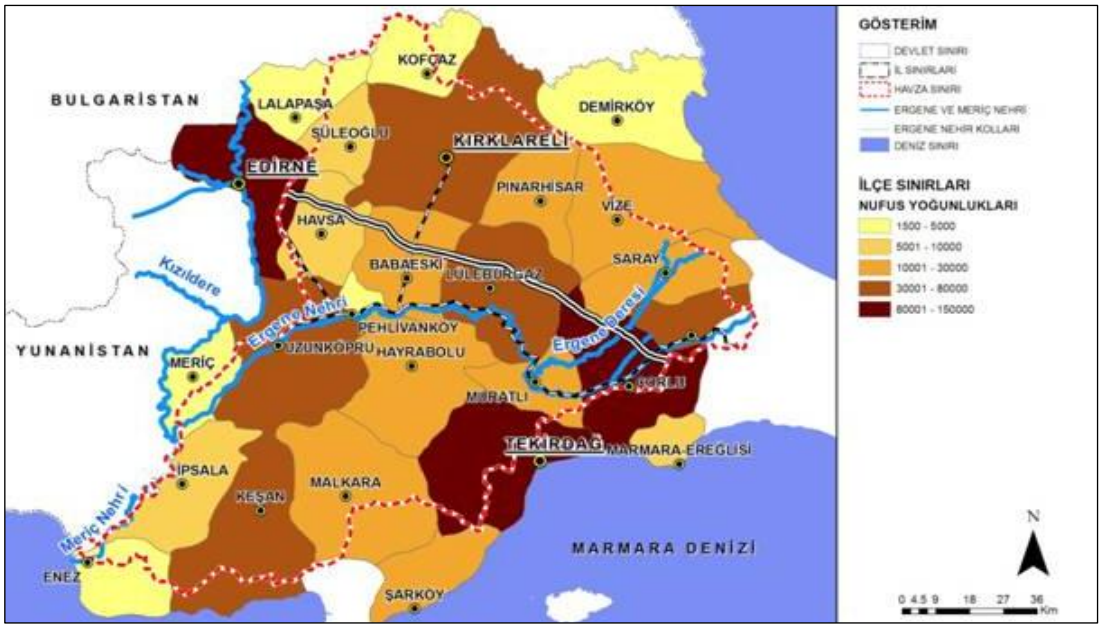
Havzada, 2012 yılında Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından gerçekleştirilen adrese dayalı nüfus sayımı sonuçlarına göre 1.593.247 kişi yaşamaktadır. Türkiye nüfusu 1965'ten 2012 yılına kadar %141 oranında artış gösterirken, Trakya Bölgesi'nin nüfusu 849.001'den 1.593.247'ye çıkarak %87,7 artış göstermiştir (URL-1). Şekil 3.2'de görüleceği gibi sanayinin gelişmesine bağlı olarak bölgenin

nüfusu her yıl artmaktadır. Özellikle Tekirdağ İl'inde Çerkezköy ve Çorlu organize sanayi bölgelerinin etkisi ile nüfus artışı daha fazla görülmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Ergene Havzası'nda nüfus dağılımı (URL-1)

Havzanın su toplama alanı yaklaşık 11.000 km^2'dir ve Ergene Nehri havzadaki en önemli su kaynağıdır. Havzanın kuzey doğusunda yer alan Istranca Dağları'ndan doğan Ergene Deresi KD-KB akış aşağı yönünde akmakta ve doğudan gelen Çorlu Deresi ile birleşerek Ergene Nehri olarak adlandırılmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2014). Ergene Nehri ana kolu, Ergene Deresi ve Çorlu Deresi akış kolları Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Önemli yan kolları ile birlikte 338 km uzunluğa sahip olan Ergene Nehri daha sonra Meriç Nehri ile birleşerek Saroz Körfezi'ne dökülmektedir.



Şekil 3.3. Meriç - Ergene Havzası'nda bulunan ilçelerin nüfus dağılımı (URL-1)

3.2. Ergene Havzası'nda Tarım ve Sanayi

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı (2010) tarafından gerçekleştirilen Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Plan Çalışması'nda Ergene Havzası'nın %72,64'ünü tarıma elverişli toprakların, geri kalan %27,36'sını yerleşim alanlarının, sanayi bölgelerinin, ormanların, kayalıkların ve göllerin oluşturduğu bildirilmektedir. Havzadaki önemli tarım ürünlerinin başında çeltik, ayçiçeği ve buğday gelmektedir. Tarım arazilerinin %4,7'sini sulu tarım yapılan araziler oluştururken %43,6'sı kuru tarım arazileridir. Meriç Nehri ile Ergene Nehri'nin birleştiği Keşan bölgesinin batı kısmındaki az eğimli bölgelerde yoğun olarak pirinç tarlaları mevcuttur. Türkiye'de üretilen pirincin %55'i kadarı Trakya bölgesinde üretilmektedir. Ayrıca, havza genelinde çok sayıda evsel ve endüstriyel kirletici kaynağı mevcuttur (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. İller bazında atıksu kaynaklarının sektörlere göre ayrımı (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010)

İL-OSB	**Kaynak Sayısı**	**İL-OSB**	**Kaynak Sayısı**
TEKİRDAĞ		**EDİRNE**	
Deri Endüstrisi	1	Tekstil Endüstrisi	3
Ağaç Endüstrisi	3	Kağıt Endüstrisi	2
Karışık endüstriyel akımlar	14	Metal Endüstrisi	2
Evsel Nitelikli Sular	140	Evsel Nitelikli Sular	6
Tekstil Endüstrisi	221	Gıda Endüstrisi	40
Petrol Sanayii	2	TOPLAM	53
Kağıt Endüstrisi	13	**KIRKLARELİ**	
Kimya Endüstrisi	48	Cam Endüstrisi	3
Metal Endüstrisi	40	Tekstil Endüstrisi	19
İçki Sanayi	8	Kimya Endüstrisi	3
Gıda Endüstrisi	61	Evsel Nitelikli Sular	19
Diğer Atıksular	2	Gıda Endüstrisi	19
TOPLAM	553	TOPLAM	63

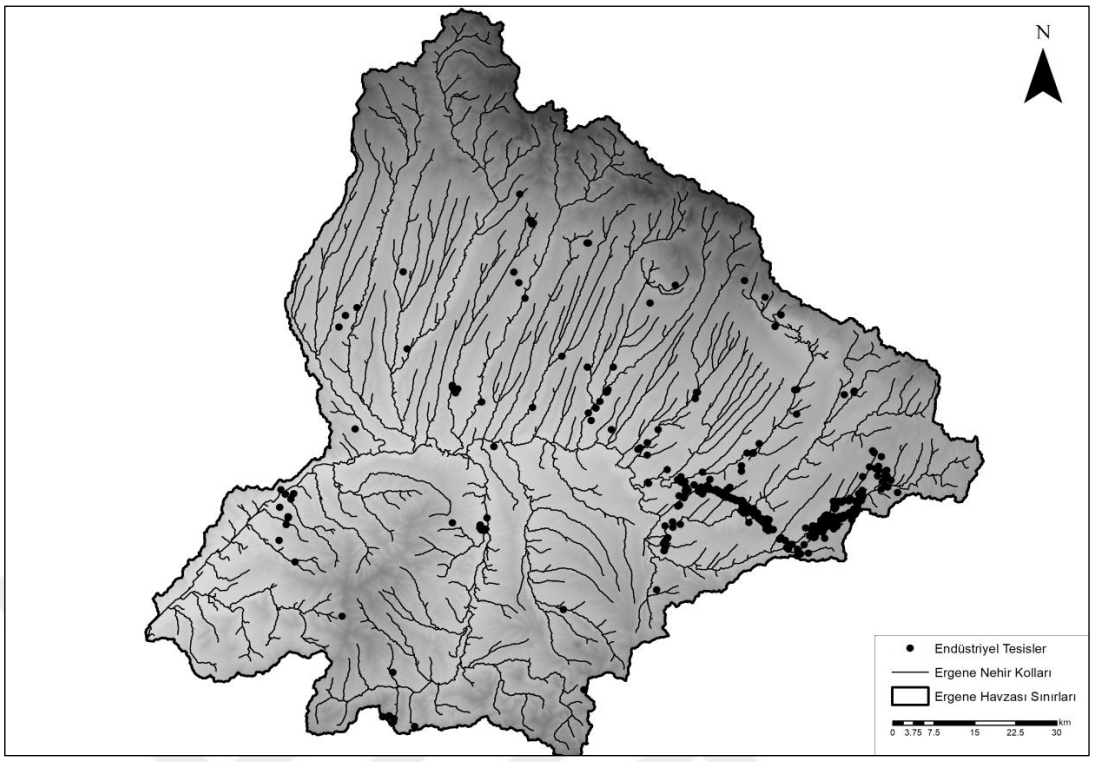
T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı (2010) tarafından sunulan raporda elverişli tarım arazilerine sahip bölgede oluşan tarıma dayalı ekonominin, tarımsal ürün girdisi kullanan sanayi kuruluşlarının bölgede çoğalmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Bu rapora göre bu kuruluşlar süt ürünleri, bitkisel yağ, un ve hayvan yemi üreten tesislerdir. Kimya endüstrisi, metal endüstrisi, tekstil endüstrisi gibi kuruluşlar,

İstanbul'un sanayi yükünü azaltmak için yapılan destekler ve yatırım indirimleri sebebi ile Trakya Alt Bölgesi'ne yoğunlaşmışlardır. Bölgede ekonomik gelişmeler 1980'li yıllarla başlamış, 1990'dan itibaren Tekirdağ'da özellikle tekstil sektöründe büyük gelişme yaşanmıştır (Tablo 3.1).

Yine aynı raporda (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010) bölgenin tarıma dayalı ekonomisinin zamanla hizmet sektörü ve sanayi ağırlıklı bir hal aldığı ifade edilmektedir. 1980'li yıllardan sonra deri işletmeleri Çorlu Deresi kenarında yapılanmaya başlamıştır. Avrupa ülkeleri çevre koruma politikaları sebebiyle tabakhane işletmeciliğinden uzak dururken, Türkiye bu ihtiyacı karşılamıştır. Ülkemizin deri ihracatının %27'si bu bölgeden yapılmaktadır. Konfeksiyon ve Tekstil endüstrilerinin ihtiyaç duyduğu hammadde ve doğal kaynaklar sebebiyle, bu kaynaklara sahip olan Tekirdağ çekim merkezi haline gelmiştir (Tablo 3.1). Sanayi tesisleri, Trakya Alt Bölgesi'ne yayılmış olsa da genellikle birkaç aks üzerinde toplanmıştır. Bu aksların en yoğun olanları;

- Çorlu – Velimeşe – Veliköy – Çerkezköy
- Çorlu – Marmaracık – Ulaş – Vakıflar – Misinli – Büyükkarıştıran – Lüleburgaz
- Çorlu – Türkgücü Köyü
- Çorlu – Tekirdağ Yolu
- D–100 karayolu – Evrensekiz –Ahmetbey
- Büyükkarıştıran – Muratlı
- Uzunköprü – Keşandır.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2015) tarafından "Evsel ve Endüstriyel Kirlilik İzleme Programı" kapsamında yapılan su kalitesi izleme çalışmaları sonucunda birçok parametre bakımından nehir suyunun IV. Sınıf olduğu bildirilmiştir. Bu parametreler oksijenlendirme parametreleri (BOİ, KOİ ve ÇO), nütrientler, metaller (iz elementrler) ve biyolojik parametrelerdir (fekal koliform, toplam koliform). Bu çalışma sonucu Evrensekiz Deresi'nin nütrient ve organik kirliliğine sahip olduğu, Çorlu Deresi alt kısımlarının ise ağır metal kirliliği ile baskı altında olduğu tespit edilmiştir. 2013 yılından bu yana havzanın genel su kalitesi her yıl IV. Sınıf'tır.

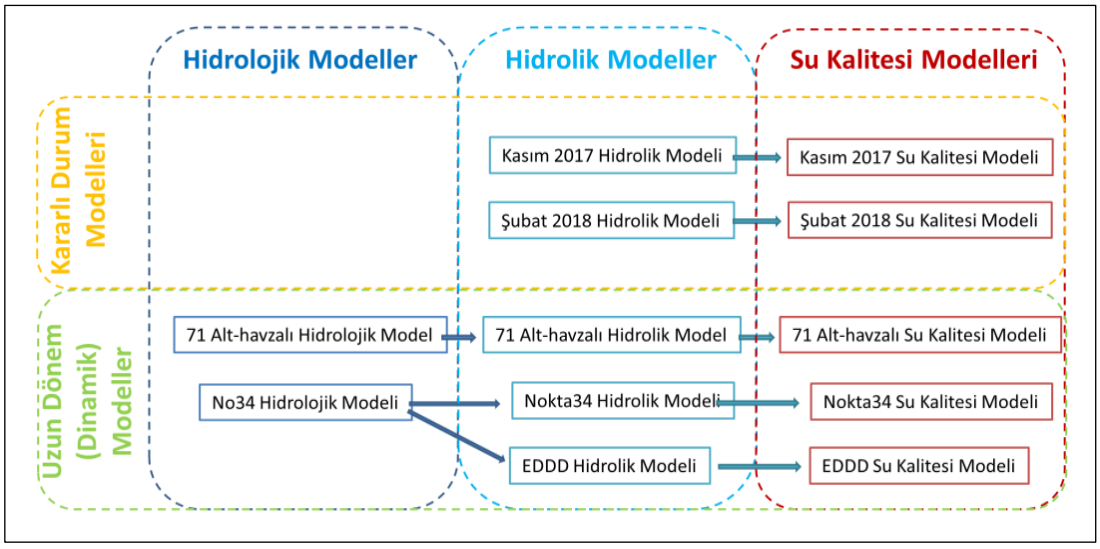


Şekil 3.4. Ergene Havzası içerisindeki endüstriyel tesislerin dağılımı

Tez çalışmasının bir parçası olduğu TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı "Ergene Havzası Su Kalitesi Yönetimi İçin Kirletici Parmak İzine Bağlı Coğrafi Bilgi Sistemi Bazlı Karar Destek Sistemleri Geliştirilmesi" başlıklı proje kapsamında Ergene Havzası'ndaki tüm endüstriyel tesisler için güncel bir envanter hazırlanmıştır (Şekil 3.4). Ergene Deresi ve Çorlu Deresi alt-havzaları dahilinde farklı sektörlerden çok sayıda endüstriyel tesisin bulunduğu görülmüştür. Havzanın orta kısımlarındaki endüstriyel tesisler genellikle Ergene Nehri kıyılarında görülmektedir. Ergene Havzası içerisindeki endüstriyel tesisler tarafından nehre neredeyse doğal debisinin 3 katı kadar atıksu deşarj edilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015). Ergene Nehri bu deşarjların sebep olduğu kirlik yükünün baskısı altındadır. Proje dahilinde Ergene Nehri boyunca dört mevsim konvansiyonel kirleticilerin ve 250 adet mikrokirleticinin ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucu Ergene Nehri'nin çok çeşitli mikrokirleticiler tarafından insan sağlığını tehdit edecek ölçüde kirlendiği belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında bu mikrokirleticilerden biri olan ve ölçüm yapılan her dönem hemen her noktada tespit edilen hexa(methoxymethyl)melamine (HMMM) organik kirleticisinin taşınım benzeşimi yapılmıştır.

4. ERGENE NEHRİ İÇİN HİDROLİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde Ergene Nehri'ne özgü kirletici taşınımı modeli kurulması amacıyla en uygun hidrolik model oluşturulması için gerçekleştirilen çalışmalar yer almaktadır. Bu kapsamda beş adet hidrolik model geliştirilmiştir (Şekil 4.1). Bunlardan ikisi kararlı durum modelleri olan Kasım 2017 Hidrolik Modeli ve Şubat 2018 Hidrolik modelleridir. Bu modeller nehir ağı üzerinde ölçüm dönemlerinde ölçüm yapılmayan noktalarda debi, hız ve derinlik parametrelerini hesaplama imkânı sunan modellerdir. Aynı zamanda kararlı durum hidrolik modelleri aynı isimli kararlı durum taşınım modellerine altyapı sağlamaktadırlar. Diğer üç hidrolik model uzun dönemli modeller olan 71 Althavzalı Hidrolik Model, Nokta34 Hidrolik Modeli ve Ergene Derin Deniz Deşarjı (EDDD) Modeli'dir. Bu modellere su girdileri 115Y064 numaralı projenin bir diğer paydaşı olan ODTÜ tarafından geliştirilen uzun dönemli hidrolojik modellerden elde edilmiştir (Tezel ve diğ., 2019). Geliştirilen uzun dönem hidrolik modeller aynı isimli taşınım modellerine altyapı sağlamaktadır. Hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin kurulması için ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilmiş olan Storm Water Management Model (SWMM) (Rossman, 2015) yazılımı kullanılmıştır. Modellerin oluşturulma aşamaları ve elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır.



Şekil 4.1. Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellerin gösterilmesi

4.1. Hidrolik Model için Veri Setinin Oluşturulması

Bu bölümde modelleme çalışmalarına başlamadan önce elde edilen verilerin düzenlenmesi ve model girdisi olmaya uygun hale getirilmesi çalışmaları yer almaktadır. Öncelikle havzaya ait sayısal yükseklik modeli işlenmiştir. Ardından Devlet Su İşleri'nden (DSİ) elde edilen akım verileri anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Daha sonra 115Y064 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilen saha çalışmaları sonucunda elde edilen veriler anlatılmıştır. Son olarak yine 115Y064 numaralı proje kapsamında geliştirilen hidrolojik modeller ve çıktılarının tez çalışmasında nasıl kullanıldığı anlatılmıştır.

4.1.1. Havzanın sayısal yükseklik modelinin işlenmesi

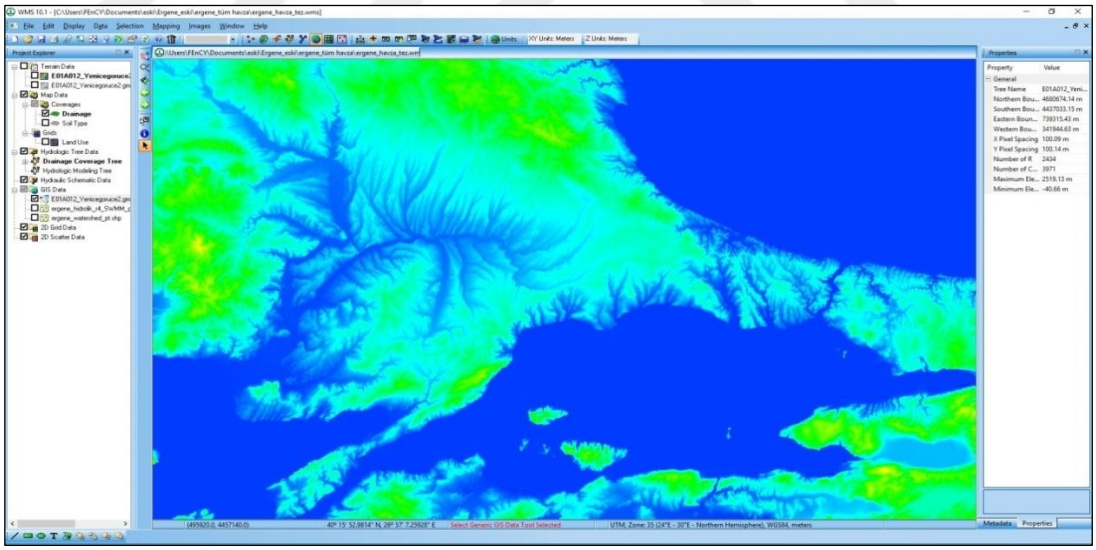
Coğrafi bilgi sistemleri (CBS), mekânsal verileri depolamayı, temsil etmeyi ve yönetmeyi amaçlayan bir yazılım ve donanım sistemi olarak tanımlanabilir. Roger Tomlinson'un 1960'lı yılların başına gerçekleştirdiği çalışmalardan bu zamana kadar çeşitli şekillerde gelişen CBS teknolojisi havza modelleme gibi büyük ölçekli çalışmalarda kolaylıklar sunmaktadır (Pistocchi, 2014).

CBS'lerde öncelikli veri sayısal yükseklik modelleridir. Sayısal yükseklik modeli (SYM) kavramı 1958'de Charles Leslie Miller tarafından bir topoğrafik veri tabanı olarak tanımlanmıştır (Miller ve Leflamme, 1958; Zomer ve ark., 2002). CBS teknolojisinin kullanıldığı, özellikle havza modelleme gibi çalışmalarda SYM'ler temel veri gereksinimlerinden biridir. Havza modelleme çalışmalarında havzanın sınırlarının ve akış kollarının belirlenmesinde kullanılırlar. SYM'ler topoğrafik

ölçümler, hava fotoğraflaması, uydudan görüntüleme gibi yöntemlerle elde edilebilir. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ve The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), uydular aracılığıyla uzaktan algılama teknikleri ile üretilmiş ve kullanıma sunulmuş SYM'ler sağlamaktadırlar. Bu SYM'lerden her ikisi de küresel kapsama alanına sahiptirler. Bu nedenle yerel analizlerde kullanımları sorunlara yol açabilmektedir. Çevresel sistemlerin insan etkisi ile değişmesi ve çevresel modellerin artan karmaşıklığı nedeni ile SYM'lerin de hassas ve güncel olması gerekmektedir. Daha yüksek çözünürlük sağlamak için Light Detection And Ranging (LiDAR) gibi

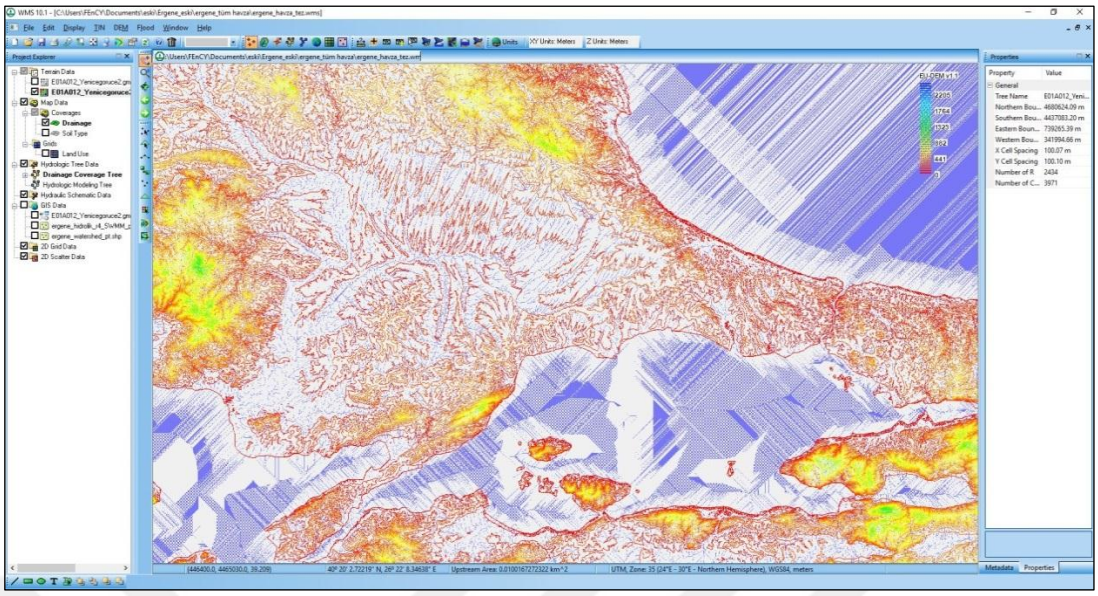
hava sistemleri kullanılmaktadır. Ancak bu bölgesel ölçekli modeller de yaygın olarak bulunmamaktadır (Pham ve diğ., 2018).

Ergene Havzası'nın sayısal yükseklik modelinin oluşturulması için Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından, ağırlıklı ortalama yaklaşımı kullanılarak üretilen, SRTM ve ASTER GDEM verilerinin bir arada kullanıldığı 1 ark-saniye (25 m) çözünürlüğe sahip hibrit bir SYM verisi (URL-2) kullanılmıştır. Havzanın sayısal yükseklik modelinin işlenmesinde ve hidrolik modelde kullanılacak girdi dosyaların hazırlanmasında coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı bir yazılım olan Watershed Modeling System (WMS) yazılımı kullanılmıştır. WMS ayrıca hidrolik ve su kalitesi modellerinin geliştirilmesinde kullanılan SWMM yazılımı için arayüz sağlamaktadır. Aquaveo firması tarafından geliştirilmiş olan WMS yazılımı, içerisinde pek çok hesaplama aracı barındıran, bir havza modelleme yazılımdır (Aquaveo, 2017). Ergene havzasını kapsayan ve tif formatında ulaşılan SYM verisinin WMS ortamına aktarılmış hali Şekil 4.2'de verilmiştir. Projeksiyon; UTM, Zone: 35 (24°E - 30°E – Northern Hemisphere), WGS84 olarak ayarlanmıştır.

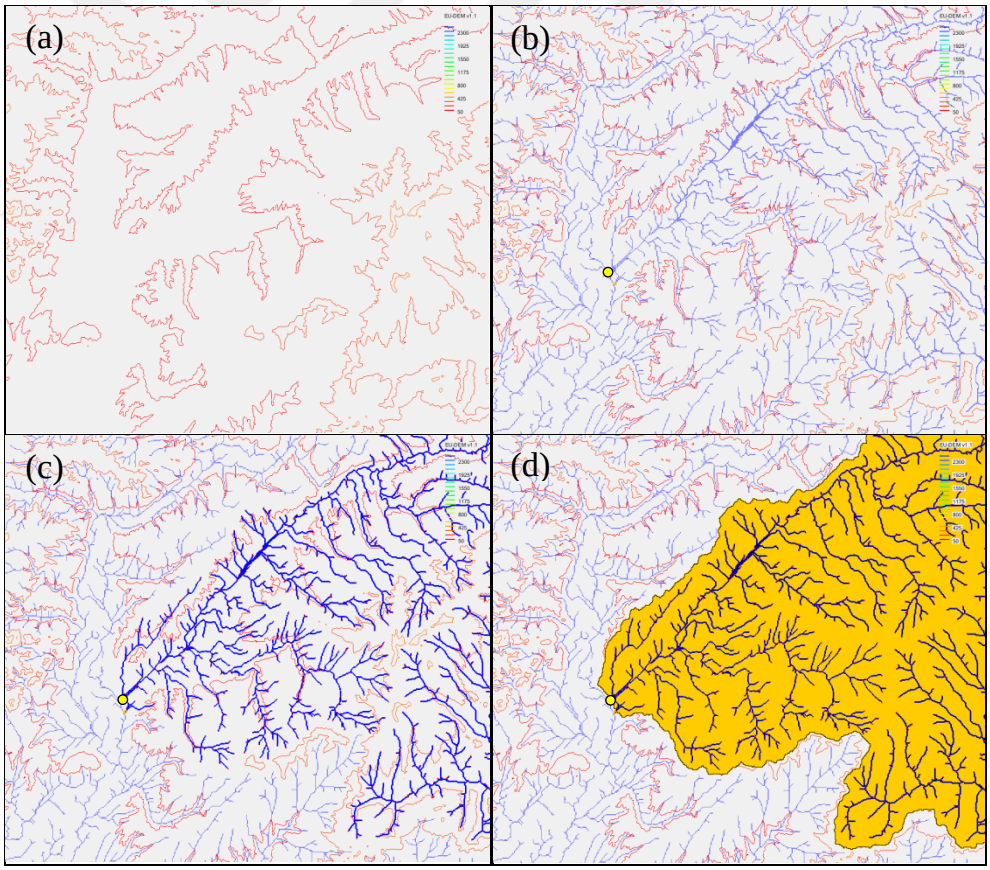


Şekil 4.2. Tif uzantılı sayısal yükseklik verisinin WMS ortamındaki görünümü

Tif formatındaki bu veri WMS araçları kullanılarak SYM formatına dönüştürülmüştür (Şekil 4.3). SYM verilerini kullanarak WMS araçları ile 1 km^2'lik alanda toplanacak suyun oluşturacağı olası su yolları belirlenmiştir. Şekil 4.3'de mavi çizgiler olası su yollarını ifade etmektedir.



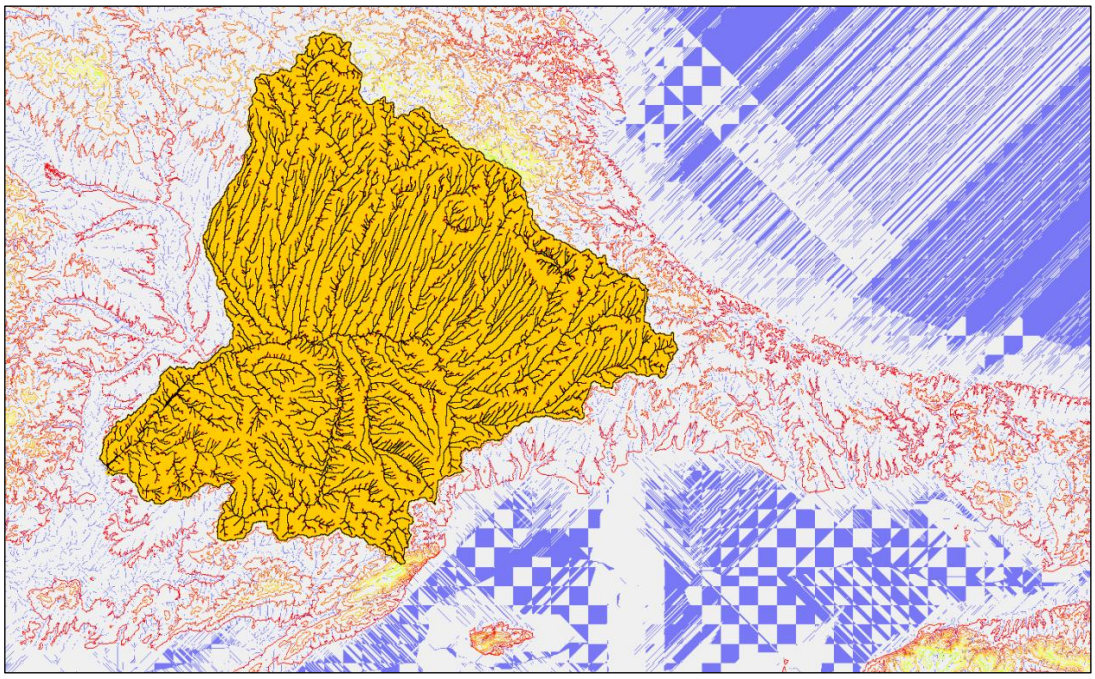
Şekil 4.3. SYM'nin ve olası su yollarının (mavi çizgiler) WMS ortamındaki görünümü.



Şekil 4.4. WMS yazılımı ile havza sınırı ve olası akış kolları belirleme adımları; a) Tif dosyasından elde edilen SYM, b) SYM üzerinde belirlenen olası akış kolları, c) seçilen havza çıkış noktasına göre oluşturulan akış kolları, d) akış kollarını kapsayan havza sınırları

SYM (Şekil 4.4 (a)) verilerini kullanarak WMS araçları ile belirlenen olası su yolları (Şekil 4.4 (b)) üzerinde Ergene Nehri ile Meriç Nehri'nin birleşiminden hemen önceki nokta (sarı yuvarlak ile gösterilen) Ergene Havzası'nın çıkış noktası olarak seçilmiştir (Şekil 4.4 (b)). Bu çıkış noktasına göre su toplama alanını oluşturacak akış kolları Şekil 4.4 (c)'de gösterilmiştir. Daha sonra oluşturulan bu akış kollarını kapsayan Ergene Havzası sınırları Şekil 4.4 (d)'de gösterilmiştir.

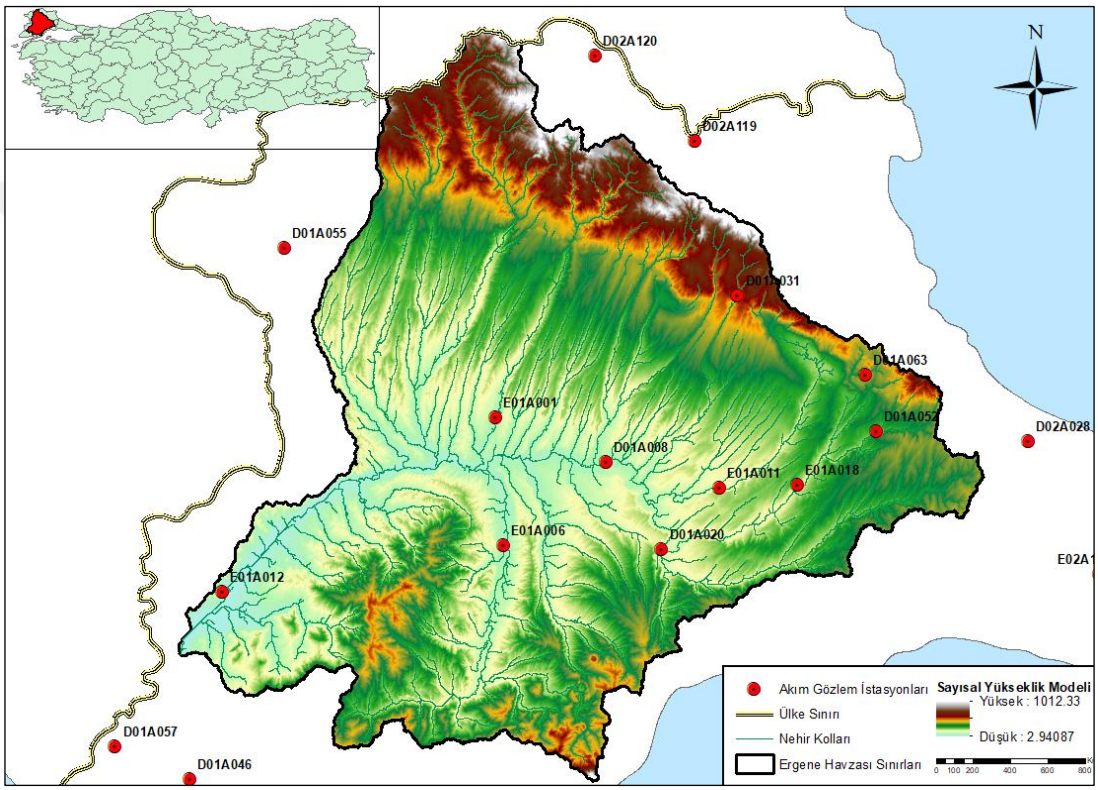
Bu kapsamda WMS ile belirlenen Ergene Havzası sınırları ve 1 km^2'lik alanda oluşacak suyu toplayacak olası akış kolları Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu şekilde oluşturulan havzanın alanı 11009 km^2 ve içindeki akış kollarının toplam uzunluğu 8823 km'dir. Ancak bu kolların her birinde sürekli olarak su bulunması beklenmemektedir. Yağışsız dönemlerde bazı kollarda su bulunmaması olasıdır. Bu nedenle ve modelleme çalışmasının amacı doğrultusunda akarsu kollarında sadeleştirilmeye gidilmiştir. Ayrıca otomatik havza tanımlama ve akış kollarının belirlenmesi çıkarılan DEM ile kolaylıkla gerçekleştirilmiş olsa da DEM ürünlerindeki veri eksikliklerinden kaynaklanan hatalar mevcuttur (M Azami, 2017). Bu hatalar gerçekleştirilen saha çalışmaları ile en aza indirilmeye çalışılmıştır. Sadeleştirme ve doğruluğu iyileştirilmiş kanal ağı oluşturma çalışmaları Bölüm 4.2.1'de detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.



Şekil 4.5. Ergene Havzası ve olası akış kolları

4.1.2. Akım analizleri

Hidrolik ve su kalitesi modellerinin kurulacağı dönemi belirlemek için Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından işletilen akım gözlem istasyonları (AGİ) verilerinin analizi yapılmıştır. Ergene Havzası sınırları içerisinde ve çevresinde bulunan AGİ'lerin konumları Şekil 4.6'de gösterilmektedir. Bu 17 adet AGİ'den 10 tanesi Ergene Havzası sınırları içerisinde bulunmaktadır.



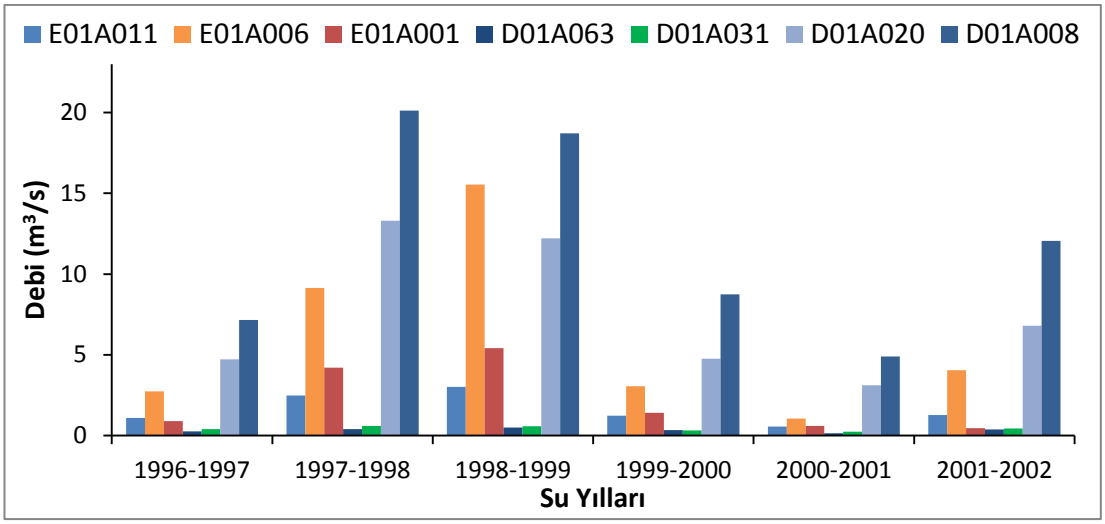
Şekil 4.6. Ergene Havzası üzerindeki ve çevresindeki AGİ'ler

Havza çıkış noktasına en yakın AGİ, E01A012 istasyon numaralı Yenicegörüce AGİ'sidir. Tablo 4.1'den görüleceği gibi Yenicegörüce AGİ'de yalnızca 1997–2005 su yılları arasındaki akım verileri gözlemlenmiş bulunmaktadır. Bu zaman aralığında kesitisiz akım verisine sahip istasyonlar yine Tablo 4.1'den görüleceği gibi E01A001, E01A006, D01A008, D01A020, E01A011, D01A031 ve D01A063 no'lu AGİ'lerdir. Ergene Havzası sınırları içerisinde kalan ve 1997–2005 su yılları arasında kesintisiz akım verisine sahip bu 8 istasyondan, D01A063 no'lu AGİ 25,8 km^2 ile en küçük su toplama alanına, E01A012 no'lu (Yenigörüce) AGİ ise 10508 km^2 ile en büyük su toplama alana sahiptir.

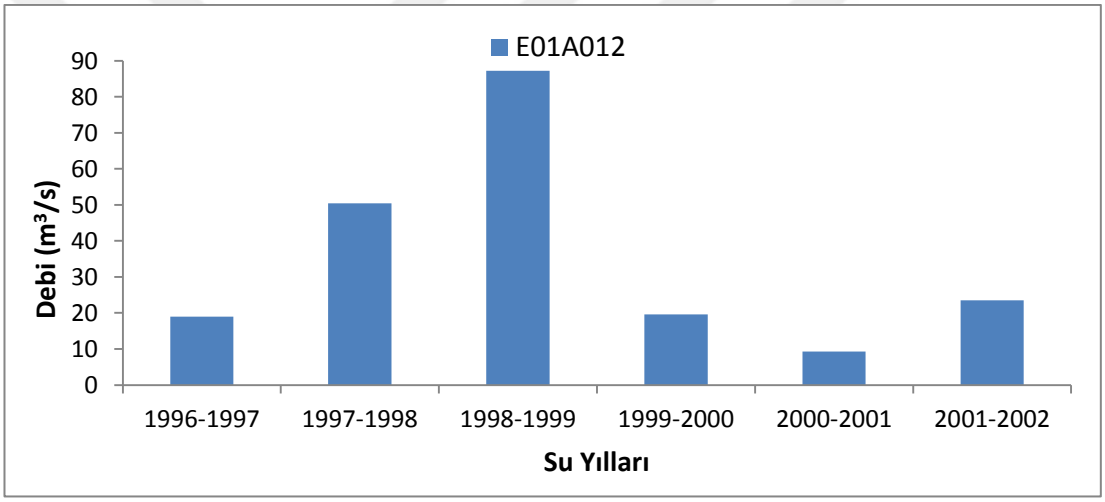
Tablo 4.1. Ergene Havzası üzerindeki ve çevresindeki AGİ'lere ait bilgiler

İstasyon No	Akarsu ismi	İstasyon açılış-kapanış tarihleri	Yağış alanı (km^2)	Gözlem yıları
D01A008	Ergene Nehri	1948	2794	1957-2014
D01A020	Ergene Nehri	1961	1415	1962-2014
E01A012	Ergene Nehri	1962	10508	1997-2005
E01A018	Ergene Nehri	2006	418,7	2006-2007, 2010-2014
E01A005	Ergene Nehri	1969-1996	10195	1970-1994
D01A057	Meriç Nehri	1985	50140	1986-2010
E01A001	Şeytan Deresi	1957	478,4	1959-2016
D01A063	Ayvacık Deresi	1987-2016	25,8	1988-2014
E01A006	Hayrabolu Deresi	1969	1381,2	1970-2014
D01A012	Lüleburgaz Çayı	1957-1978	633	1962-1978
E01A011	Anaçay	1988	379,2	1989-2007, 2010-2014
D01A046	Hamzadere	1970-2007	69,9	1971-1979, 1981-2006
D01A031	Soğucak Deresi	1964	71,3	1965-2014
D01A011	Anadere	1959-1972	273,5	1961-1971
E01A010	Uzundere	1979-2002	129,8	1981-2002
E01A002	İnece Deresi	1957-1974	788,8	1962-1974
D01A052	Manika Deresi	1976	118,3	1976-1989, 1993-2001, 2003-2005, 2007, 2009-2011
D01A013	Hayrabolu Deresi	1952-2007	92,18	1961-1985, 1989-1994, 1996-2004

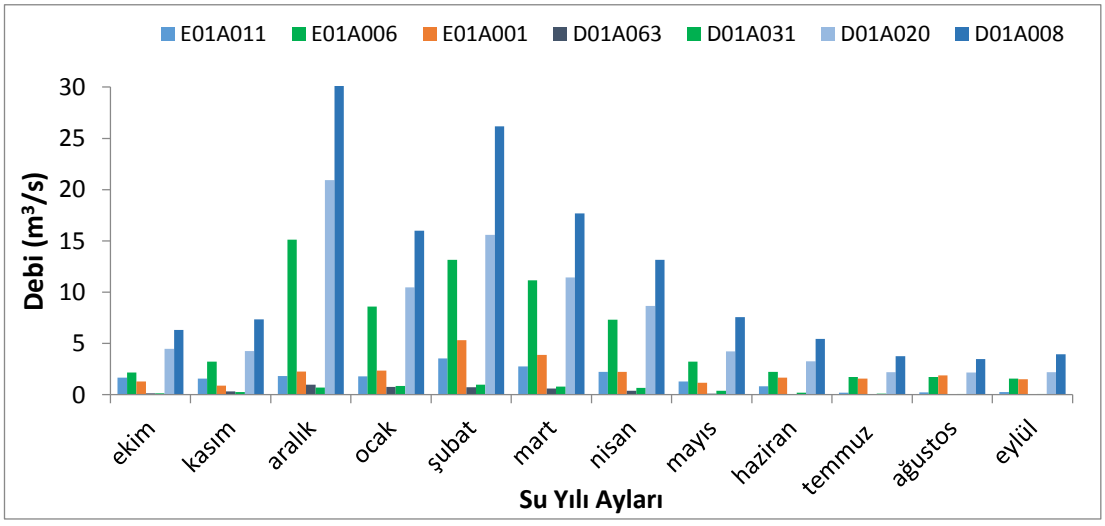
Şekil 4.7'de E01A001, E01A006, D01A008, D01A020, E01A011, D01A031 ve D01A063 AGİ'leri için ve Şekil 4.8'de E01A012 no'lu Yenigörüce AGİ için 1997-2002 su yılları arası yıllık ortalama akım değerleri verilmiştir. Buradan görüleceği gibi 6 yıllık zaman periyodundaki en yağışlı yıllar 1998, 1999 ve 2002 su yılları iken, 1997, 2000 ve 2001 su yılları az yağış almıştır. Şekil 4.9'da 1997-2002 yılları boyunca Yenigörüce AGİ hariç diğer tüm AGİ'lerde gözlemlenen akımların aylık ortalamaları grafik üzerinde gösterilmiştir. Yenigörüce AGİ için bu ortalamalar Şekil 4.10'da gösterilmektedir. AGİ'lerdeki aylık ortalamalara bakıldığında en yüksek akım şubat aylarında en düşük akım yaz aylarında gözlemlenmiştir.



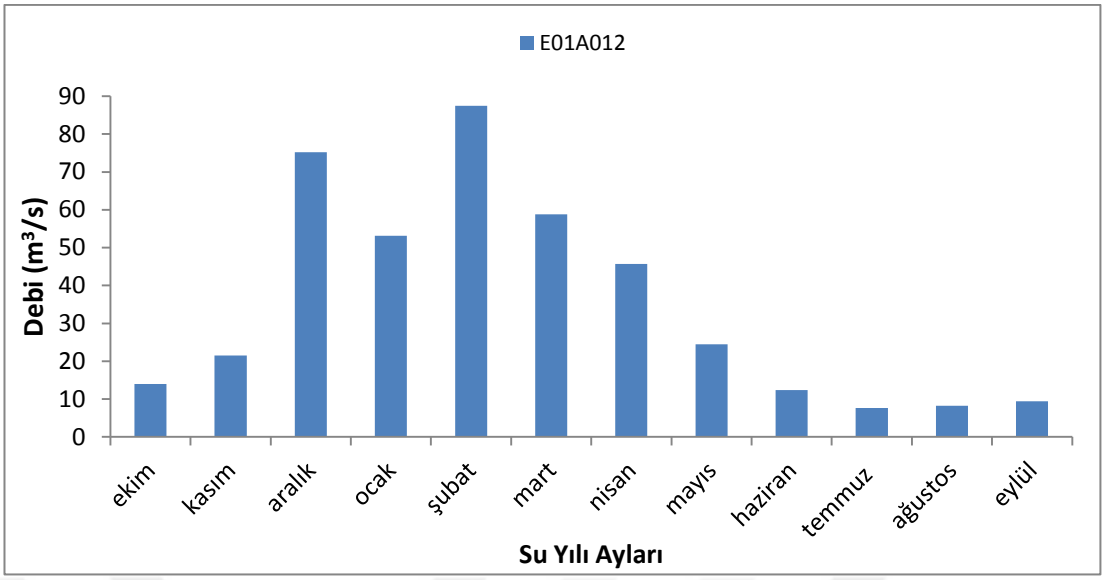
Şekil 4.7. 1997-2002 su yılları için AGİ'lerdeki yıllık ortalama akımlar



Şekil 4.8. 1997-2002 su yılları için E01A012 No'lu Yenigörüce AGİ'deki yıllık ortalama akımlar



Şekil 4.9. 1997-2002 su yılları için AGİ'lerdeki aylık ortalama akımlar

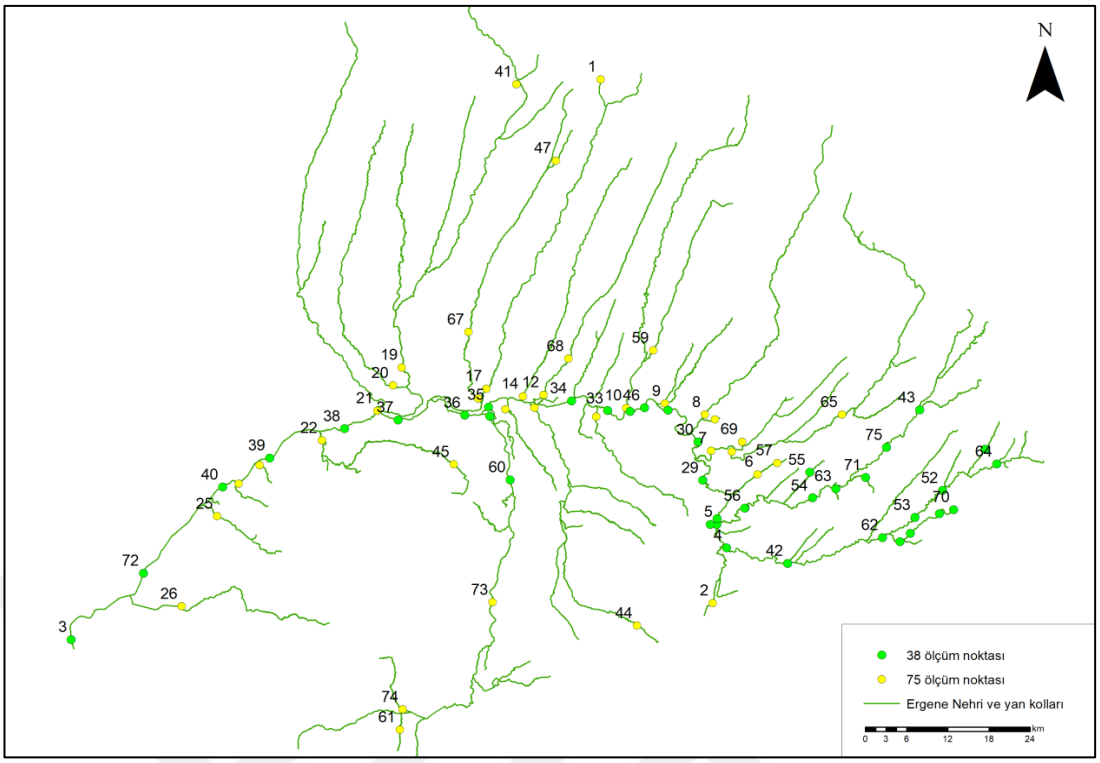


Şekil 4.10. 1997-2002 su yılları için Yenigörüce AGİ'deki aylık ortalama akımlar

4.1.3. Saha ölçümleri

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı proje kapsamında Ergene Nehri üzerinde belirlenen 75 noktada Ağustos 2017, Kasım 2017, Şubat 2018 ve Mayıs 2018 aylarında birbirini takip eden 4 gün boyunca Yabataş firması tarafından su kalitesi örnekleri alınmıştır. Bu 75 nokta nehir üzerindeki endüstriyel deşarjlar gibi noktasal ve tarım gibi yayılı kaynaklı kirliliğin irdelenebilmesi için bu kaynakların olası konumları göz önünde alınarak seçilmiştir. Kasım 2017 ve Şubat 2018 aylarında su kalitesi örneklemesi ile eş zamanlı olarak, 75 nokta içinden seçilen 38 noktada Ekoton firması tarafından debi, enkesit, yükseklik, derinlik ve hız ölçümleri yapılmıştır. Bu 38 noktanın belirlenmesinde akım durumu, morfolojik durum, sanayileşme vb. hususlar dikkate alınmıştır. Ölçüm noktalarında yükseklik okuması iki firma tarafından da gerçekleştirilmiş karşılaştırılması Bölüm 4.2.2'de yapılmıştır.

Şekil 4.11'de Ergene Nehri ve olası akış kolları üzerinde su kalitesi örneklemelerinin yapıldığı 75 nokta ve bu noktalar arasından debi enkesit ölçümü yapılan 38 noktanın konumları gösterilmektedir. Şekil 4.11'den görüleceği gibi 38 ölçüm noktasının konumları tüm nehirdeki akım durumunu temsil edebilecek şekildedir.



Şekil 4.11. Su kalitesi örneklemelerinin yapıldığı 75 nokta ve bu noktalar arasından debi-enkesit ölçümü yapılan 38 noktanın konumlarının gösterilmesi

Ergene Nehri'ne özgü hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesi sırasında bu 38 nokta dikkate alınmıştır (Şekil 4.11). Kirletici taşınım modellerinin çözünürlüğünü artırabilmek için ölçüm noktaları sanayi kuruluşlarının yoğun şekilde bulunduğu Çorlu ve Ergene Dereleri üzerinde daha sık seçilmiştir. Tablo 4.2'de ölçüm dönemleri ve bu dönemlerde ölçülen parametreler özetlenmiştir.

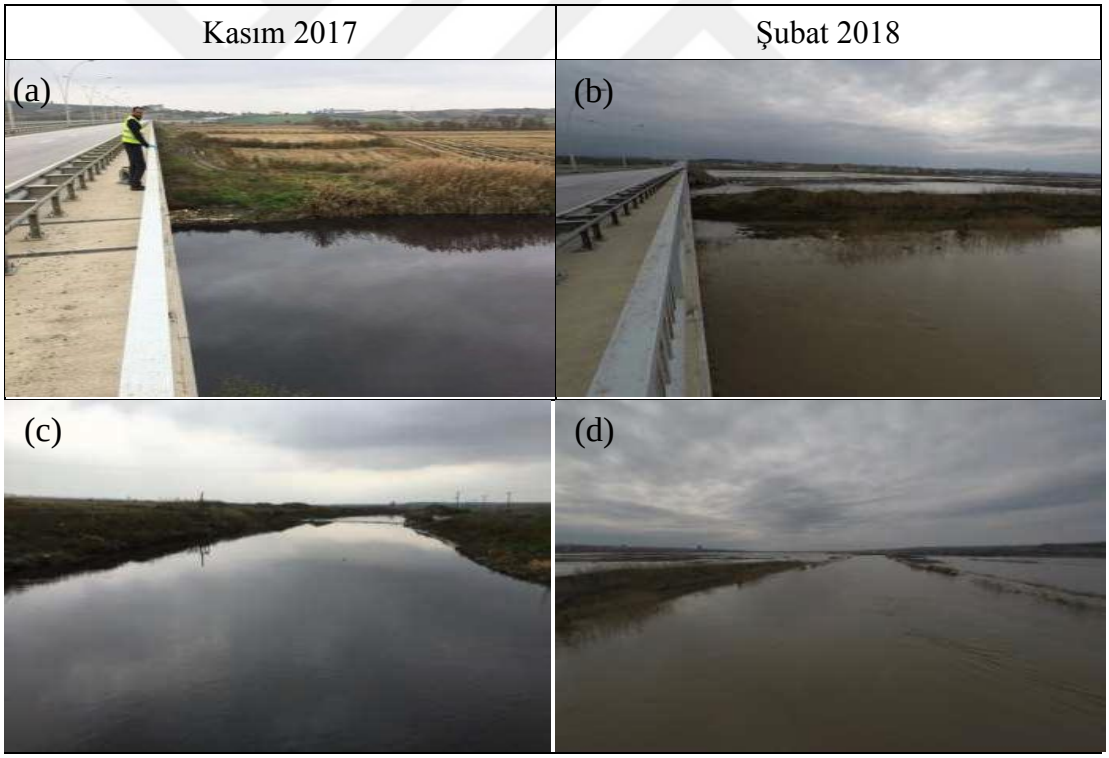
Tablo 4.2. Ölçüm dönemleri ve ölçülen parametreler

	Ölçüm dönemi			
Parametre	Ağustos 2017	Kasım 2017	Şubat 2018	Mayıs 2018
Su kalitesi	✓	✓	✓	✓
Debi	✗	✓	✓	✓
Enkesit	✗	✓	✓	✗
Hız	✗	✓	✓	✗
Derinlik	✗	✓	✓	✓

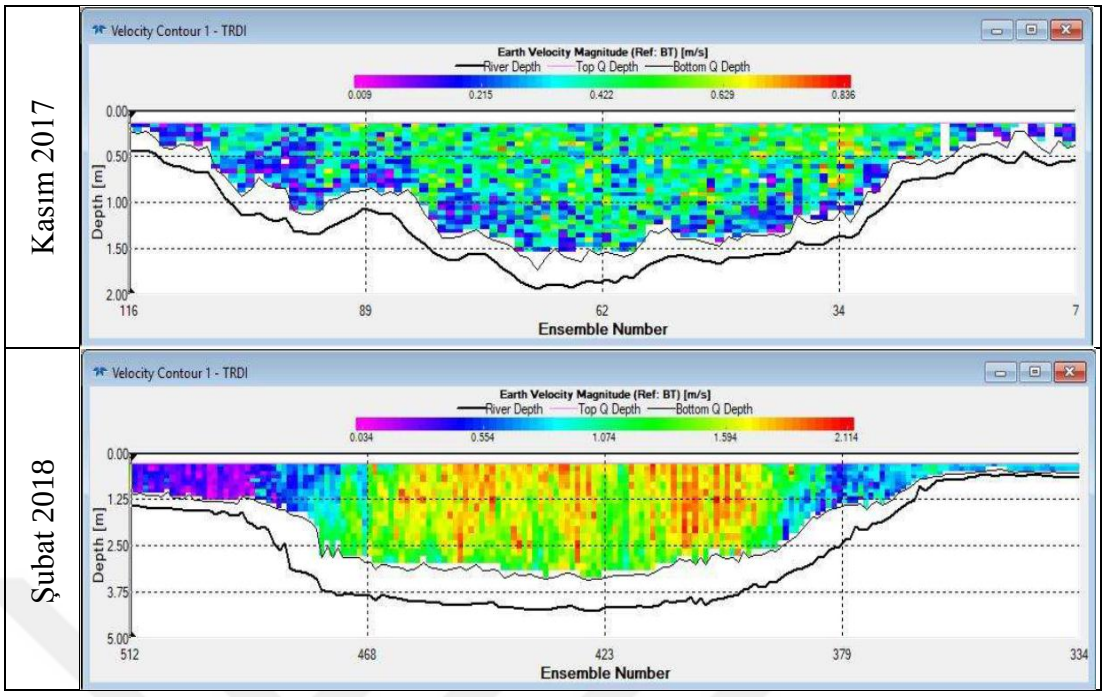
Tablo 4.2'den görülebileceği gibi su kalitesi örnekleri tüm ölçüm dönemlerinde alınmasına karşın tüm parametrelerin kesintisiz örneklendiği iki dönem Kasım 2017

ve Şubat 2018 dönemleridir. Bu durumdan hareketle kararlı durum hidrolik ve su kalitesi modellerinin bu iki dönemi temsilen kurulmasına karar verilmiştir.

Şekil 4.11'de verilen 38 nokta için akım ve enkesit verileri Ekoton firması tarafından Akustik doppler akım profili (ADCP) çıkarıcı cihaz ile belirlenmiştir. ADCP ile ayrıca akış kesiti alt hücrelere bölünerek her bir hücrede eş zamanlı olarak hız ölçümü yapılmaktadır (URL-3). Bu ölçümlerin sonucunda enkesit alanı ve ortalama hız hassas bir şekilde belirlenebilmekte ve akış debisi hesaplanabilmektedir. Örnek olarak, ADCP ile 39 numaralı noktada Kasım 2017 ve Şubat 2018 döneminde yapılan ölçüm işlemine ait fotoğraflar nehir Şekil 4.12 (a) ve (b)'de sağ sahil, Şekil 4.12 (c) ve (d)'de önden görülecek şekilde verilmiştir. Görüleceği gibi Şubat 2018 döneminde yağış ve kar erimesi gibi nedenlerden dolayı çok daha büyük akış gözlenmiştir.

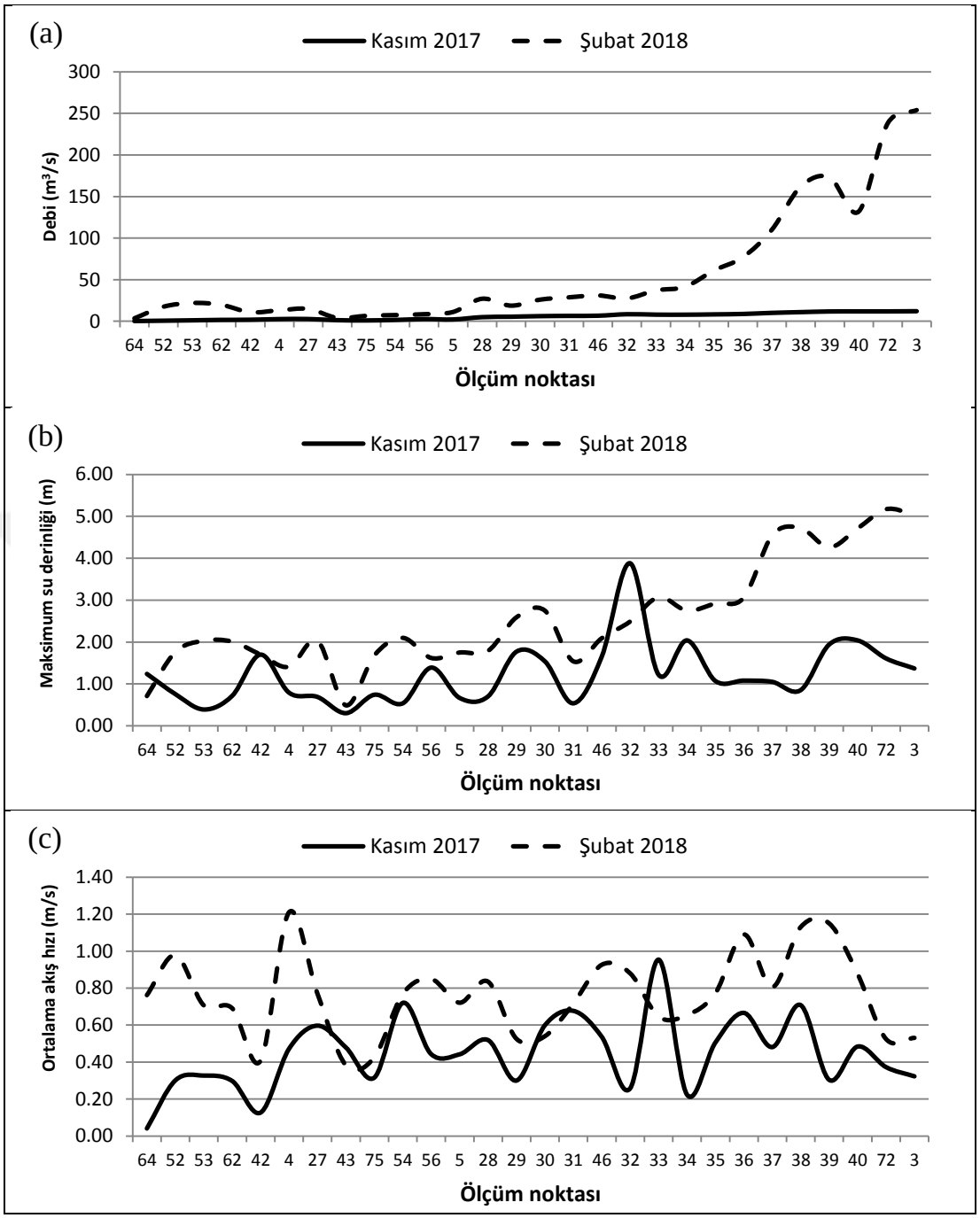


Şekil 4.12. 39 numaralı ölçüm noktası için Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde alınan enkesitlerin gösterilmesi (EKOTON, 2017; EKOTON, 2018), a) Kasım 2017 döneminde 39 numaralı noktada nehrin sağ sahil görünümü, b) Şubat 2018 döneminde 39 numaralı noktada nehrin sağ sahil görünümü, c) Kasım 2017 döneminde 39 numaralı noktada nehrin önden görünümü, d) Şubat 2018 döneminde 39 numaralı noktada nehrin önden görünümü



Şekil 4.13. 39 numaralı ölçüm noktası için ADCP ile belirlenen akış enkesiti ve hız dağılımı (EKOTON, 2017; EKOTON, 2018)

Şekil 4.13'de 39 numaralı ölçüm noktası için enkesit ve hız dağılımı Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemleri için gösterilmektedir. Şubat 2018 döneminde ıslak alan çok daha büyük gözlemlenmiştir. Tüm örnekleme noktalarında (38 nokta) bu şekilde gerçekleştirilen ölçümlerden Çorlu Deresi (ölçüm noktası 64, 52, 53, 62, 42, 4) Ergene Deresi (ölçüm noktası 27, 43, 75, 54, 56, 5) ve Ergene Nehri Ana Kolu (ölçüm noktası 28, 29, 30, 31, 46, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 72, 3) hattı üzerinde kalan 28 noktaya ait debi, derinlik ve hız grafikleri sırasıyla Şekil 4.14 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 4.14'den görüleceği gibi modelleme çalışmaları için kullanılacak iki dönemin sonuçları karşılaştırıldığında Şubat 2018'de ölçülen debi, derinlik ve hız değerlerinin genel olarak Kasım 2017'den yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14. Ana nehir kolları boyunca örnekleme noktalarındaki parametrelerin farklı ölçüm dönemlerindeki değerleri, a) debiler, b) maksimum su yükseklikleri, c) ortalama akış hızları

Elde edilen saha verilerinden faydalanarak modelleme çalışmalarında kullanılacak kanal eğimlerinin belirlenmesi Bölüm 4.2.2'de, kanal enkesitlerinin belirlenmesi Bölüm 4.2.3'de ve kanalların Manning pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi Bölüm 4.2.4'de anlatılmaktadır. Gözlemlenen akım ve yük verileri ise modellerde doğrudan kullanılmayıp Excel'in Çözücü Eklentisi kullanılarak ölçüm hatalarından ve ölçüm

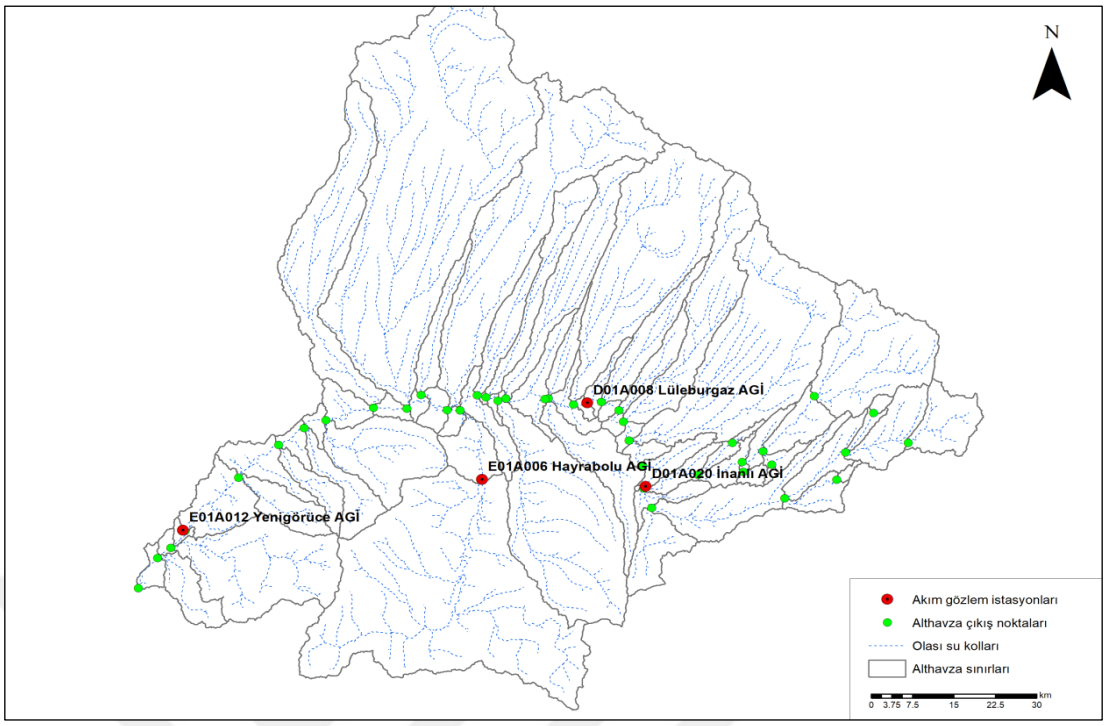
zamanındaki kısa süreli dalgalanmalardan arındırılmak için optimize edildikten sonra kullanılmıştır. Excel Çözücü Eklentisi ile optimizasyon, akım ve yük değerleri için farklı kısıtlar ile gerçekleştirilmiş olup akım için optimizasyon Bölüm 4.3'de, yük için optimizasyon Bölüm 5.2'de anlatılmaktadır.

4.1.4. Havzadaki yağış-akış ilişkisi (Uzun dönem hidrolojik modeller)

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı proje kapsamında projenin diğer ortağı ODTÜ tarafından Ergene Havzasındaki yağış-akış ilişkisini belirlemek amacıyla hidrolojik model kurulumu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Havzadaki yağış-akış ilişkisi A.B.D. Ordu Mühendisleri Birliği (U.S. Army Corps of Engineers) tarafından geliştirilmiş olan HEC-HMS (URL-7) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HEC-HMS modelinde kullanılacak girdi dosyalarının hazırlanmasında WMS yazılımı kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda "71 Alt-havzalı Hidrolojik Model" ve "Nokta34 Hidroloji Modeli" olarak adlandırılan 2 adet hidrolojik model üretilmiştir. Bu hidrolojik modeller sonucu elde edilen akım verilerinin tez çalışması kapsamında geliştirilen uzun dönem hidrolik ve su kalitesi modellerinde kullanılması hedeflenmiştir.

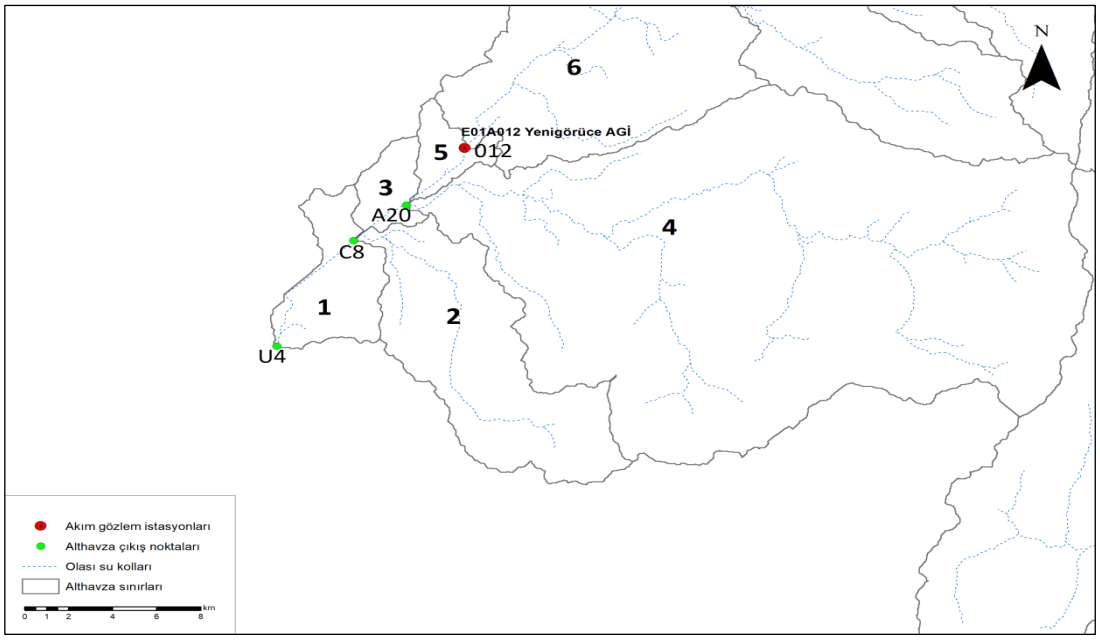
İlk model "71 Alt-havzalı Hidrolojik Model" olarak isimlendirilmiştir. Ana nehir ve yan kolları boyunca pek çok endüstriyel tesis ile organize sanayi bölgesi bulunmakta ve bu tesislerden akış kollarına pek çok noktadan kirli su deşarj edilmektedir. Buna ek olarak, Çorlu Deresi ile Ergene Deresi'ne pek çok yan kol birleşmekte ve özellikle havza alanları büyük olan birleşme noktalarında debi büyük miktarda değişmektedir. Dolayısıyla kirleticilerin ve su kalitesinin modellenebilmesi için ırmak kolları üzerinde pek çok noktada kısa aralıklarla akım verisine ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Böylece 71 Alt-havzalı Hidrolojik Model'de, Ergene Havzası boyunca geniş bir drenaj ağı oluşturan yan kolların nehir ana koluna katıldığı her bir nokta bir alt-havza çıkış noktası olarak tanımlanmıştır. Ayrıca Ergene ve Çorlu Dereleri'nde nehre kirletici deşarjı yapabilecek endüstriyel tesislerin bulunduğu bazı yan kollar üzerinde birer alt-havza çıkış noktası tanımlanmıştır. Tanımlanan havza çıkış noktalarına göre yapılan alt-havza dağılımı sonucu 71 adet alt-havza elde edilmiştir. Bu 71 adet alt havza ve 42 adet havza çıkış noktası Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. 71 alt-havza sınırı ve alt-havza çıkış noktalarının gösterilmesi

Bu alt-havzalardan bazılarının çıkış noktaları ortaktır. Örneğin Şekil 4.16'ya bakıldığında 4 numaralı yan kol alt-havzası ile 5 numaralı havzanın çıkış noktası 1 adettir ve A20 kodlu düğümdür. Aynı şekilde 2 numaralı yan kol alt-havzası ile 3 numaralı havzanın çıkış noktası 1 adettir ve C8 kodlu düğümdür. Böylelikle modelde 71 alt-havza olsa da toplamda 42 adet havza çıkış noktası bulunmaktadır.



Şekil 4.16. Ergene Havzası'nın mansap kısmının yakından görünümü

Modelde Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilmekte olan Meteoroloji İstasyonları'na (Mİ) ait 1997-2005 su yılları arasındaki yağış verileri kullanılmıştır ve bu yıllar için havzadaki yağış akış ilişkisi 115Y064 numaralı projenin bir diğer ortağı olan ODTÜ tarafından HEC-HMS yazılımı ile çözülmüştür. Hidrolojik model için 1997-2002 yılları arası kalibrasyon, 2003-2005 yılları arası verifikasyon dönemidir. Böylelikle 71 adet alt-havzada yağıştan akışa dönüşen su miktarı günlük ortalama debi değerleri olarak elde edilmiştir. Model, havzadaki 4 adet AGİ'ye ait günlük ortalama akım değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Şekil 4.15'de konumları verilen bu 4 AGİ sırasıyla membadan mansaba doğru D01A020 no'lu İnanlı AGİ, D01A008 no'lu Lüleburgaz AGİ, E01A006 no'lu Hayrabolu AGİ ve E01A012 no'lu Yenigörüce AGİ'dir. Model performansını belirlemek amacıyla Nash-Sutcliffe Etkinlik katsayısı (NSE) ve korelasyon (r) değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında kullanılan formüller sırasıyla Denklem (4.1) ve (4.2)'de verilmekte olup;

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n_t}\left(Q_t^{gözlem} - Q_t^{hesap}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n_t}\left(Q_t^{gözlem} - \bar{Q}^{gözlem}\right)^2} \tag{4.1}$$

$$r = \frac{\sum_{t=1}^{n_t}\left[\left(Q_t^{gözlem} - \bar{Q}^{gözlem}\right)\times\left(Q_t^{hesap} - \bar{Q}^{hesap}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n_t}\left(Q_t^{gözlem} - \bar{Q}^{gözlem}\right)^2 \times \sum_{t=1}^{n_t}\left(Q_t^{hesap} - \bar{Q}^{hesap}\right)^2}} \tag{4.2}$$

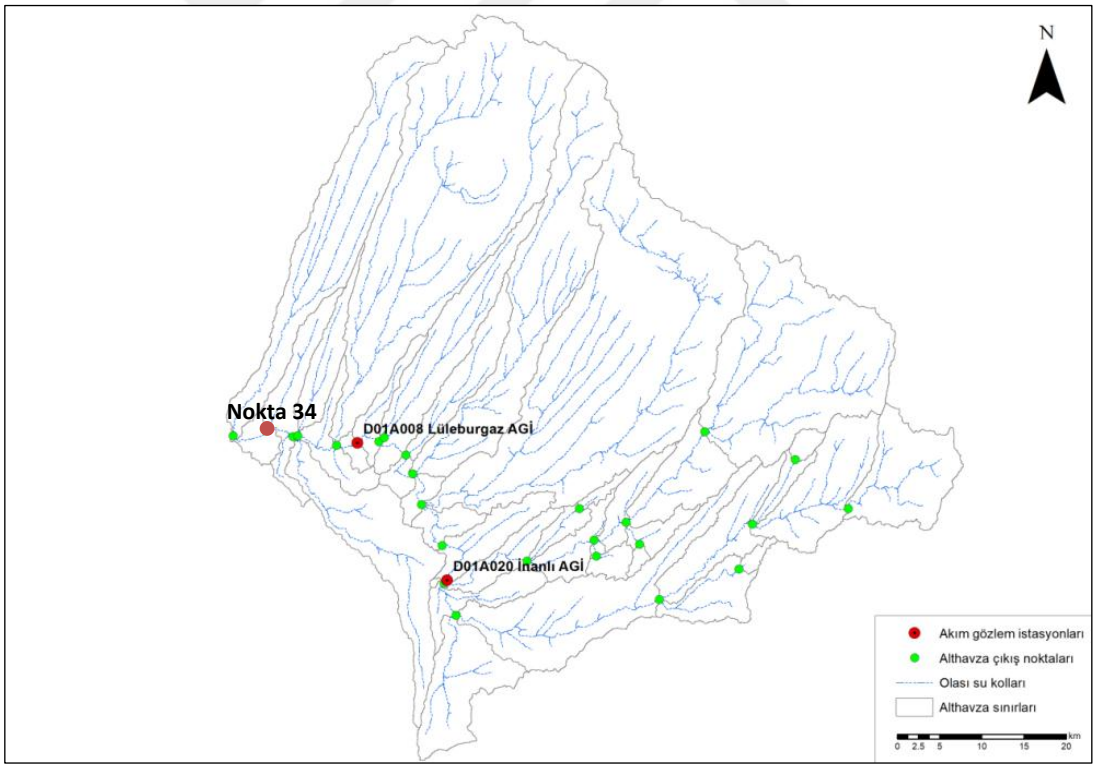
burada n_t ölçüm yapılan zaman adımı sayısını, $Q_t^{gözlem}(Q_t^{hesap})$ t anındaki zaman adımında gözlenen (hesaplanan) akım değerini, $\bar{Q}^{gözlem}$ gözlenen akım değerlerinin ortalamasını ve $\bar{Q}^{hesap}$ hesaplanan akım değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Dört AGİ için kalibrasyon sonucu elde edilen değerler Tablo 4.3'de verilmiştir. NSE değerleri tüm AGİ'ler için 0,50'nin ve r değerleri tüm AGİ'ler için 0,70'in üzerinde olacak şekilde tahmin edilmiştir. Elde edilen değerler pek çok deneme-yanılma sonucunda elde edilmiştir ve AGİ'ler için tahminleri gözlemlenmiş değerlere en çok yaklaştıran sonuçlardır. Hidrolojik modelin kalibre edilmeye çalışıldığı havzanın büyük olması, nehir kollarına endüstriler tarafından yapılan kontrolsüz deşarjlar ve nehirden sulama gibi sebeplerle çekilen sular hidrolojik modelin kalibrasyonunu güçleştirmektedir.

1997-2002 yılları için kalibre edilmiş olan 71 Alt-havzalı Hidrolojik Model kullanılarak, bu yılları için 71 alt-havzaya ve 42 adet havza çıkış noktasına ait hidrograflar elde edilmiştir. 71 adet alt-havzaya ait hidrograflar Bölüm 4.4.1'de yer verilen 71 Alt-havzalı Hidrolik Modeli'nin ve Bölüm 5.3.1'de yer verilen 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin ilgili noktalarına girdi olarak verilmiştir.

Tablo 4.3. 71 alt-havzalı hidrolojik modele ait kalibrasyon sonuçları

71 alt-havzalı Hidrolojik Model (1997-2002)							
Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)							
Yenigörüce		Hayrabolu		Lüleburgaz		İnanlı	
r	NSE	r	NSE	r	NSE	r	NSE
0,86	0,72	0,78	0,53	0,79	0,62	0,77	0,59

İkinci hidroloji modeli "Nokta34 Hidroloji Modeli" olarak isimlendirilmiştir. İsmini proje kapsamında gerçekleştirilen saha ölçümlerinin (Bölüm 4.1.3) yapıldığı noktalardan biri olan 34 numaralı noktadan almıştır (Şekil 4.17).

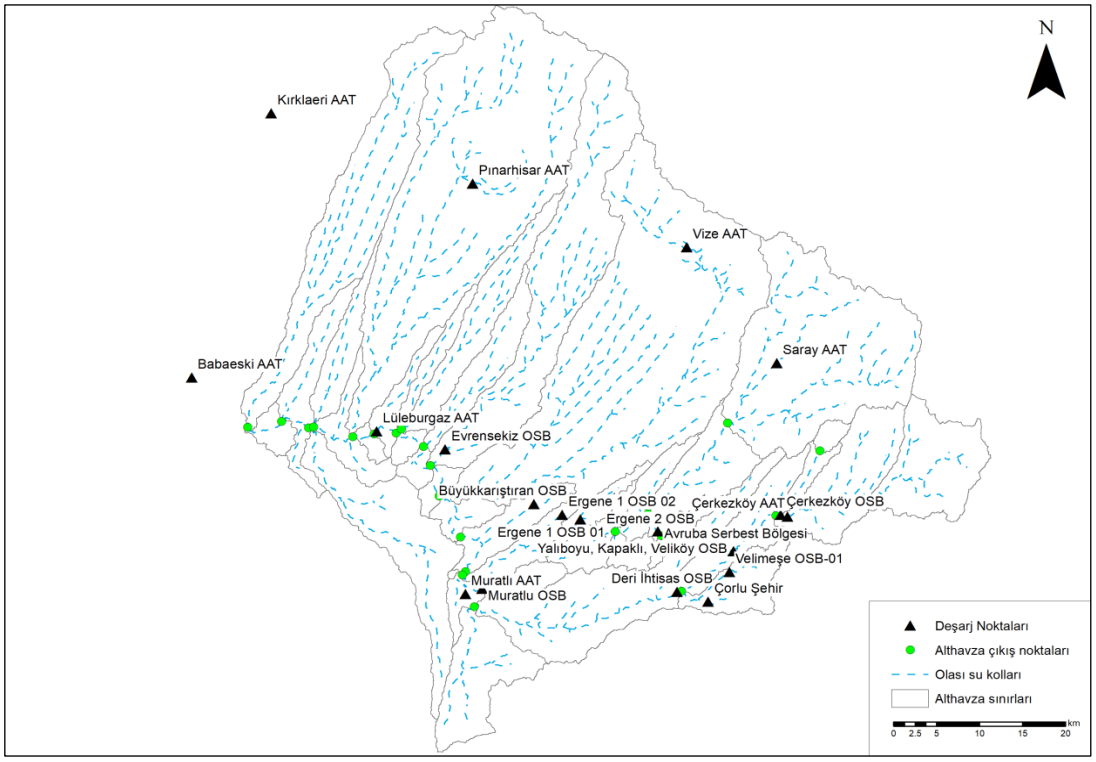


Şekil 4.17. Nokta34 Hidroloji Modeli'nde kullanılan 40 alt-havzanın dağılımı ve alt-havza çıkış noktaları

115Y064 no'lu proje çıktılarından elde edilen sonuca göre Ergene Havzası genelinde kirletici kaynaklarının çoğunluğunun 34 numaralı ölçüm noktasına ait havza

içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Bu nedenle havzanın bu kısmına odaklanan, daha güncel verilere dayanan ve havzadaki endüstriyel deşarjları da dikkate alan bir model oluşturulmak istenmiştir. Bu model 71 Alt-havzalı Hidroloji Modeli'nin, Hayrabolu Deresi ile nehir anakolunun kavuştuğu noktadan yaklaşık 10 km önce sonlandırılmasıyla elde edilmiştir. Nokta34 Hidroloji Modeli'nde 40 adet alt-havza ve 27 adet alt-havza çıkış noktası bulunmaktadır (Şekil 4.17).

Bu aşamada model kurulum ve kalibrasyonu, hidrolik model ve takip eden kirletici taşınım modeline mümkün olan en güncel koşulları yansıtan girdileri temin etmek amacıyla yürütülmüştür. MGM tarafından işletilmekte olan Mİ'lere ve DSİ tarafından işletilmekte olan AGİ'lere ait en güncel verilerin temin edilmesinin ardından güncel veri serilerinin çakıştığı tarihlere göre model kalibrasyon döneminin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda en güncel veri serileri 2015 su yılı için elde edilmiştir. Nokta34 Hidroloji Modeli günlük sıklıktaki meteorolojik veriler ve akım verilerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Ayrıca söz konusu havza içerisinde yer alan OSB'lere ve kentsel AAT'lere ait deşarj debileri noktasal kaynak olarak hidrolojik modele dâhil edilmiştir. 20 adet deşarj noktasının havza ve çevresine ait harita üzerinde gösterimi Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Önemli kentsel ve endüstriyel atıksu deşarj noktaları (Tezel ve diğ., 2019)

Şekil 4.18'den görüleceği gibi Kırklareli AAT ve Babaeski ATT modelleme alanı dışında kaldığından modelde kullanılacak deşarj kaynaklarının sayısı 18'dir. Nokta34 hidrolojik modeline eklenmiş olan ve havza içerisinde debi miktarına etkisi açısından önemli olarak değerlendirilen bu 18 deşarj kaynağının isimleri ve deşarj miktarları Tablo 4.4'de listelenmiştir.

Tablo 4.4. Önemli bazı kentsel ve endüstriyel atıksuların deşarj noktalarına ait bilgiler (Tezel ve diğ., 2019)

Deşarj kaynaklarının isimleri	Deşarj miktarı (m^3/sn)	Deşarj noktalarına karşılık gelen SWMM düğümü
Avrupa Serbest Bölgesi Deşarj	0,029	D2
Çerkezköy OSB Deşarj	0,903	D1
Çorlu Deri İhtisas OSB Deşarj	0,417	A2
Ergene 1 OSB Deşarj 01	0,347	D4
Ergene 1 OSB Deşarj 02	0,347	A3
Ergene 2 OSB Deşarj	0.694	D4
Lüleburgaz Evrensekiz OSB Deşarj	0,1	A5
Büyükkarıştıran OSB Deşarj	0,221	C3
Muratlı OSB Deşarj	0,289	A3
Velimeşe OSB Deşarj-01	0,868	A1
Çerkezköy AAT Deşarj	0,611	D1
Çorlu Şehir Deşarj	0,138	A1
Muratlı AAT Deşarj	0,061	A3
Saray AAT Deşarj	0,083	U2
Lüleburgaz AAT Deşarj	0,347	008
Pınarhisar AAT Deşarj	0,018	A7
Vize AAT Deşarj	0,043	A4
Yalıboyu, Kapaklı, Veliköy OSB Deşarj	0,868	A1

Bu şekilde çalıştırılan modelle 40 adet alt-havzada yağıştan akışa dönüşen su miktarı ve 27 adet çıkış noktasında oluşacak akımlar günlük ortalama debi değerleri olarak elde edilmiştir. Bu modelde dikkat edilmesi gerekilen bir nokta dâhil edilen

deşarjların etkisinin alt-havza hidrograflarında değil çıkış noktası hidrograflarında görüldüğüdür. Yani elde edilen alt-havza hidrografları yalnızca o havzadaki yağıştan akışa dönüşecek su miktarını içermektedir. Bu nedenle Nokta34 Hidroloji Modeli'nin alt-havza hidrografları uzun dönem hidrolik modelinde girdi olarak kullanılırken Tablo 4.4'de verilen deşarj değerlerinin hidrolik modeldeki ilgili noktalara ayrıca eklenmiştir. Model, havzadaki 2 adet AGİ'ye ait günlük ortalama akım değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir.

Şekil 4.17'de konumları verilen bu 2 AGİ sırasıyla membadan mansaba doğru D01A020 no'lu İnanlı AGİ ve D01A008 no'lu Lüleburgaz AGİ'sidir. Kalibrasyon sonucu 2 AGİ için elde edilen değerler Tablo 4.5'de verilmiştir. NSE ve r değerleri her iki AGİ için 0,80'in üzerinde olacak şekilde tahmin edilmiştir.

Tablo 4.5. Nokta34 hidroloji modeline ait kalibrasyon sonuçları

Nokta34 Hidroloji Modeli (2015)			
Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)			
Lüleburgaz		İnanlı	
r	NSE	r	NSE
0,91	0,80	0,89	0,80

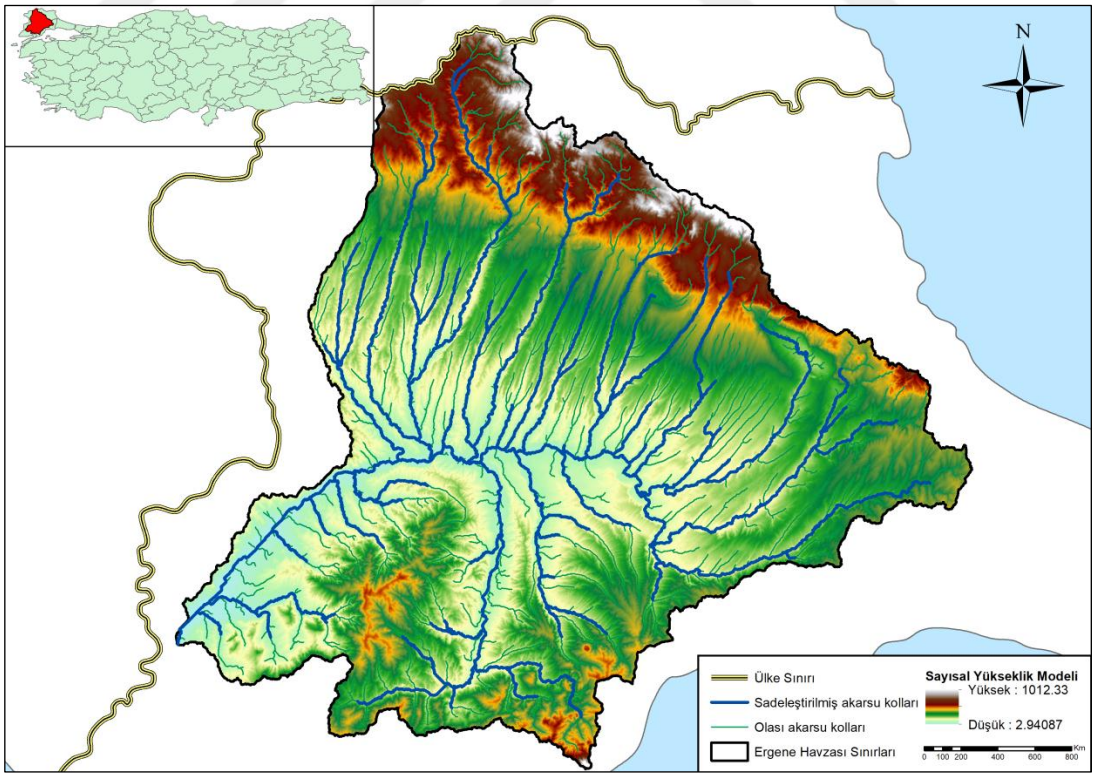
Kalibre edilmiş olan Nokta34 Hidroloji Modeli kullanılarak 2015 su yılı boyunca 40 alt-havzaya ve 27 adet havza çıkış noktasına ait hidrografların elde edilmesi sağlanmıştır. 40 adet alt-havzaya ait hidrograflar Bölüm 4.4.2'de anlatılan Nokta34 Hidrolik Modeli'nde ve Bölüm 5.3.2'de yer alan Nokta34 Taşınım Modeli'nde ilgili noktalara girdi olarak eklenmiştir.

4.2. SWMM ile Hidrolik Model Oluşturulması

Bu bölümde SWMM (Rossman, 2015) yazılımı kullanılarak Ergene Nehri'ne özgü hidrolik model oluşturması adımları anlatılmaktadır. Ergene Nehrinin hidrolik özelliklerinin belirlenmesine model kanal ağı oluşturularak başlanmıştır. İkinci aşama kanal eğimlerinin hesaplanması olmuştur. Daha sonra uygun enkesitlerin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak uygun Manning pürüzlülük katsayıları belirlenerek Ergene Nehri'nin hidrolik modeli oluşturulmuştur.

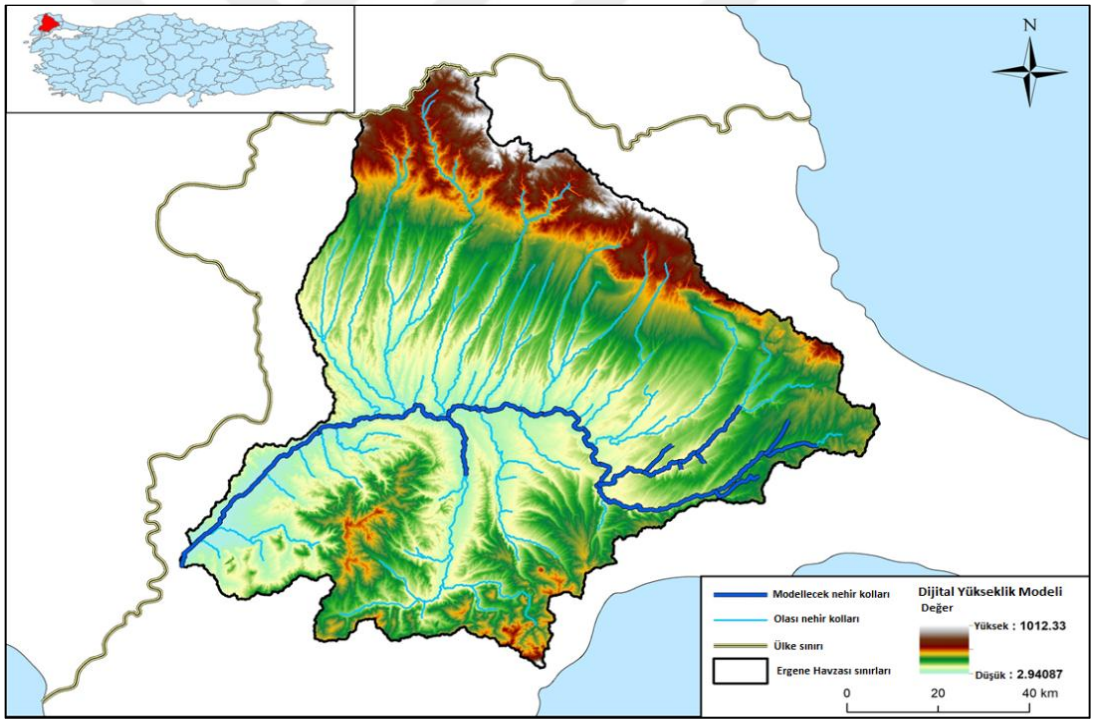
4.2.1. Kanal ağının oluşturulması

Bölüm 4.1.1'de anlatıldığı üzere sayısal yükseklik modeli kullanılarak Ergene Nehri ve olası akış kolları belirlenmiştir. Belirlenen bu akış kolları oldukça karmaşık bir akarsu ağı ortaya çıkarmaktadır. Ancak tüm akış kollarının havza boyunca doğudan batıya doğru akan bir ana kolda (Ergene Nehri) birleştiği görülmektedir. Havza içerisinde akışa dönüşen sular ve yüzey sularına ulaşan kirleticiler kademeli olarak doğudan batıya doğru Ergene Nehri'ne katılmakta ve havza çıkışına (Meriç Nehri ile kavuşma noktası) doğru taşınmaktadırlar. Bu nedenle, Ergene Nehri ana kolunun hidrolik ve su kalitesi modelinin oluşturulması ile havzadaki kirliliğin yüzey suları ile taşınımının incelenmesi mümkün olabilecektir. Bu bağlamda Ergene Nehri ana kolunun yanında kirlilik yükü bakımından kritik bazı yan kolların hidrolik ve su kalitesi modeline dahil edilerek Ergene Havzası akarsu kollarının nispeten sadeleştirilmiş bir haritası çıkarılmıştır. Sadece su toplama alanı 50 km^2'den daha büyük olan akış kollarının dahil edildiği bu sadeleştirilmiş akış kolları haritası Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



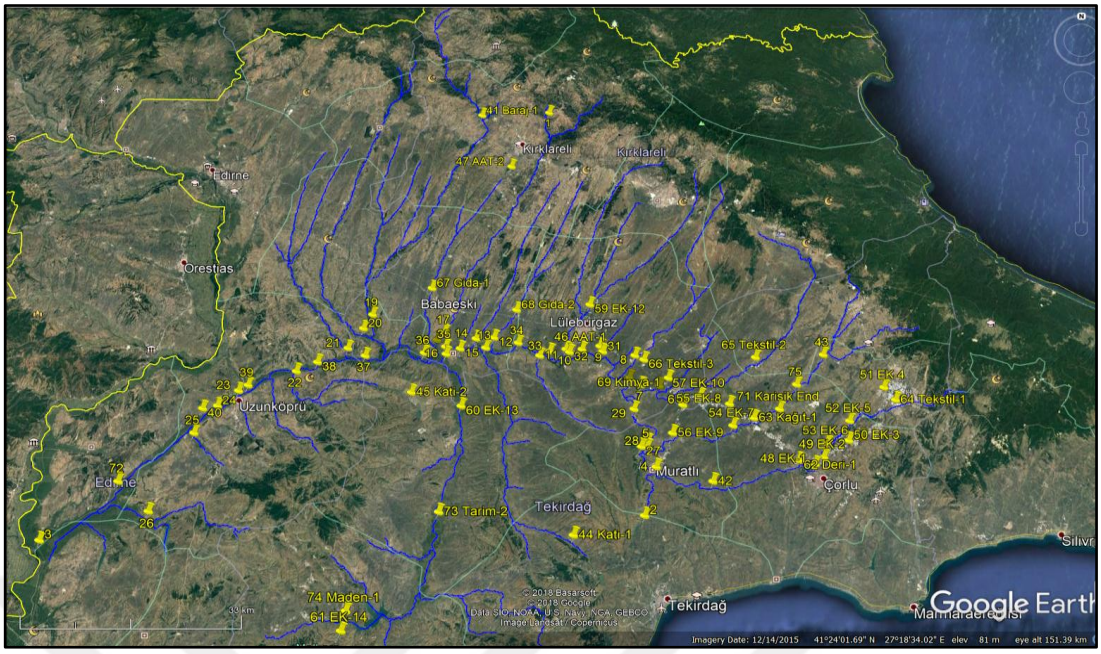
Şekil 4.19. Ergene Nehri olası akış kolları ve su toplama alanı 50 km^2'den büyük olan akarsu kollarının gösterimi

Bu yeni akış kolları haritasının üretilmesindeki amaç Ergene Nehri ana kolunun ve bu ana kola bağlanan önemli akarsu kollarının belirlenmesidir. Ancak bu akış kollarının her birinde sürekli olarak su bulunması beklenmemektedir. Bazı kollarda yağışsız dönemlerde su akımı olmaması mümkündür. Aynı zamanda su kalitesi modelinin geliştirilme amacı doğrultusunda akarsu kollarında bir kez daha sadeleştirilmeye gidilmiştir. Tüm bu hususlar göz önüne alınarak Ergene Nehri boyunca nispeten sık aralıklarla dağılmış olan yan kollar modele dahil edilmemiştir. Ancak bu kolların modellenecek kanallara bağlandığı noktaların düğüm noktası olarak kalmasına karar verilmiştir. Ayrıca modellenecek akarsu ağının Ergene Nehri ana kolu yanında havzanın doğusunda yer alan Ergene ve Çorlu Dereleri'ni de kapsamasına karar verilmiştir. Bu şekilde oluşturulan model ağı Şekil 4.20'de koyu mavi renk ile gösterilmiştir.



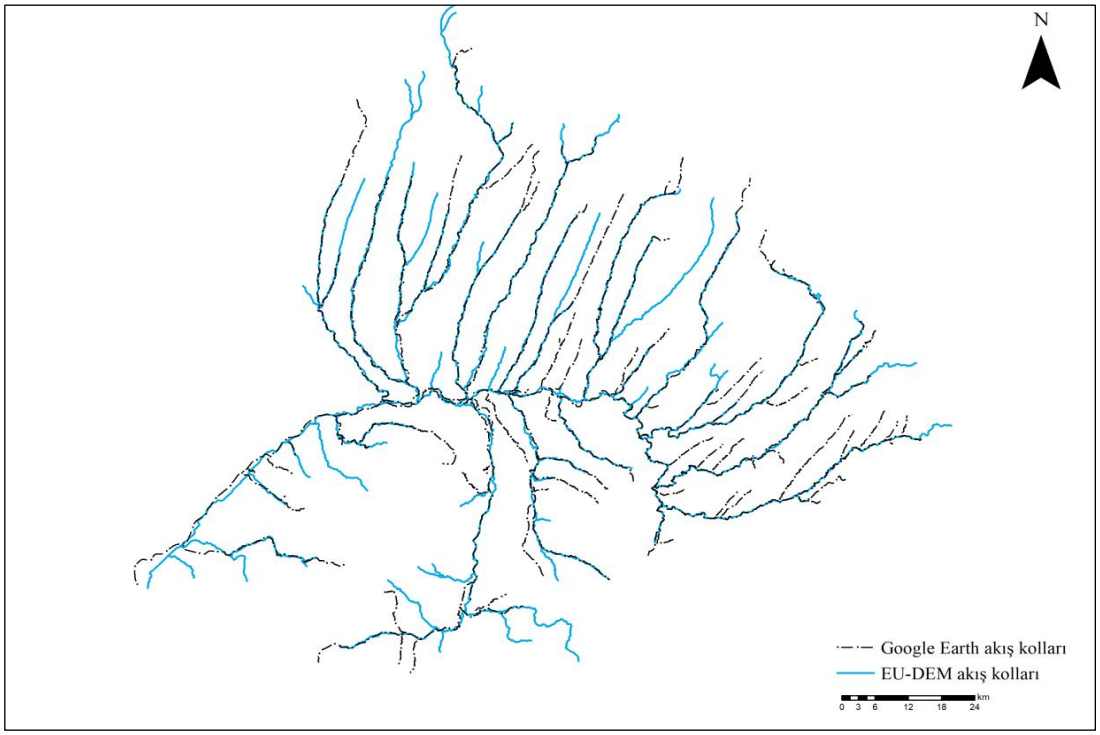
Şekil 4.20. EU-DEM ile elde edilen olası akarsu ağı üzerinde model ağının gösterilmesi

Şekil 4.21'de saha örnekleme noktaları belirlenmesinde kullanılmak üzere Google Earth üzerinde çizilen akarsu kolları ve örnekleme noktaları gösterilmektedir. Ölçümlerin tamamı belirlenen bu noktalarda alınmış olup hidrolik ve su kalitesi modelleri için Bölüm 4.1.3'de anlatıldığı üzere bu noktalardan 38 tanesi kullanılmıştır.



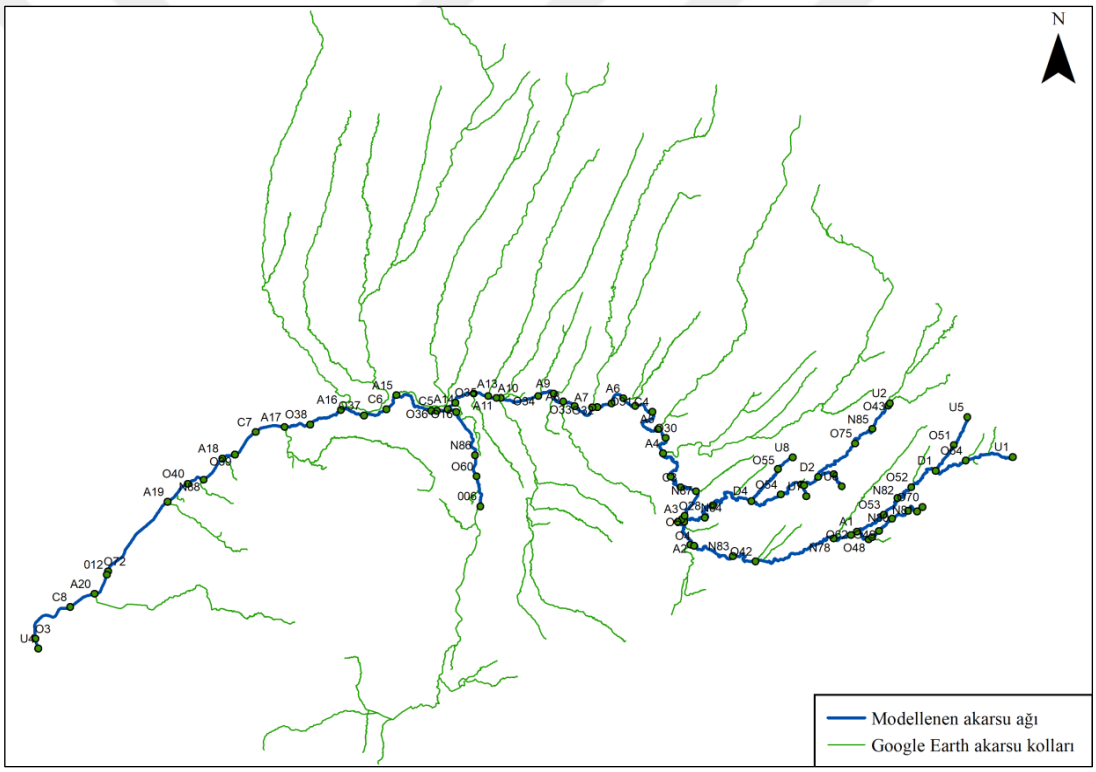
Şekil 4.21. Google Earth üzerinde çizilen akarsu kolları ve 75 ölçüm noktası

EU-DEM ile elde edilen ve Google Earth üzerinden oluşturulan akış kolları birbirinin aynı gibi görünse de bu kollar üst üste çizildiğinde (Şekil 4.22) kollar arasındaki farklılıklar ortaya çıkmıştır. Özellikle nehrin mansap kısmında bu farklılığın daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.22. EU-DEM ve Google Earth ile oluşturulan akarsu kollarının karşılaştırılması

Bu noktada DEM ürünlerindeki veri eksikliklerinden kaynaklanan hatalar (M Azami, 2017) belirlenmiş olup akış kollarını gerçeğe daha yakın hale getirebilmek için Google Earth kollarının kullanılmasına karar verilmiştir. Google Earth kanalları WMS arayüzüne aktarılarak belirlenen sadeleştirmeler bu kollar üzerinde yapılmıştır. Ayrıca model sonuçları ile gözlem verilerini karşılaştırmayı kolaylaştırmak için bir kanal içerisinde birden fazla ölçüm noktası olmaması sağlanmıştır. Bunun için gerektiğinde bir kanal üzerine ek bir düğüm noktası eklemek suretiyle yeni kanallar oluşturulmuştur. Bunun amacı SWMM'e nehir içi akışın modellenmesinde daha yüksek çözünürlük sağlamaktır. Bu şekilde oluşturulan modellenecek akarsu ağını temsil eden model linkleri ve düğüm noktaları Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



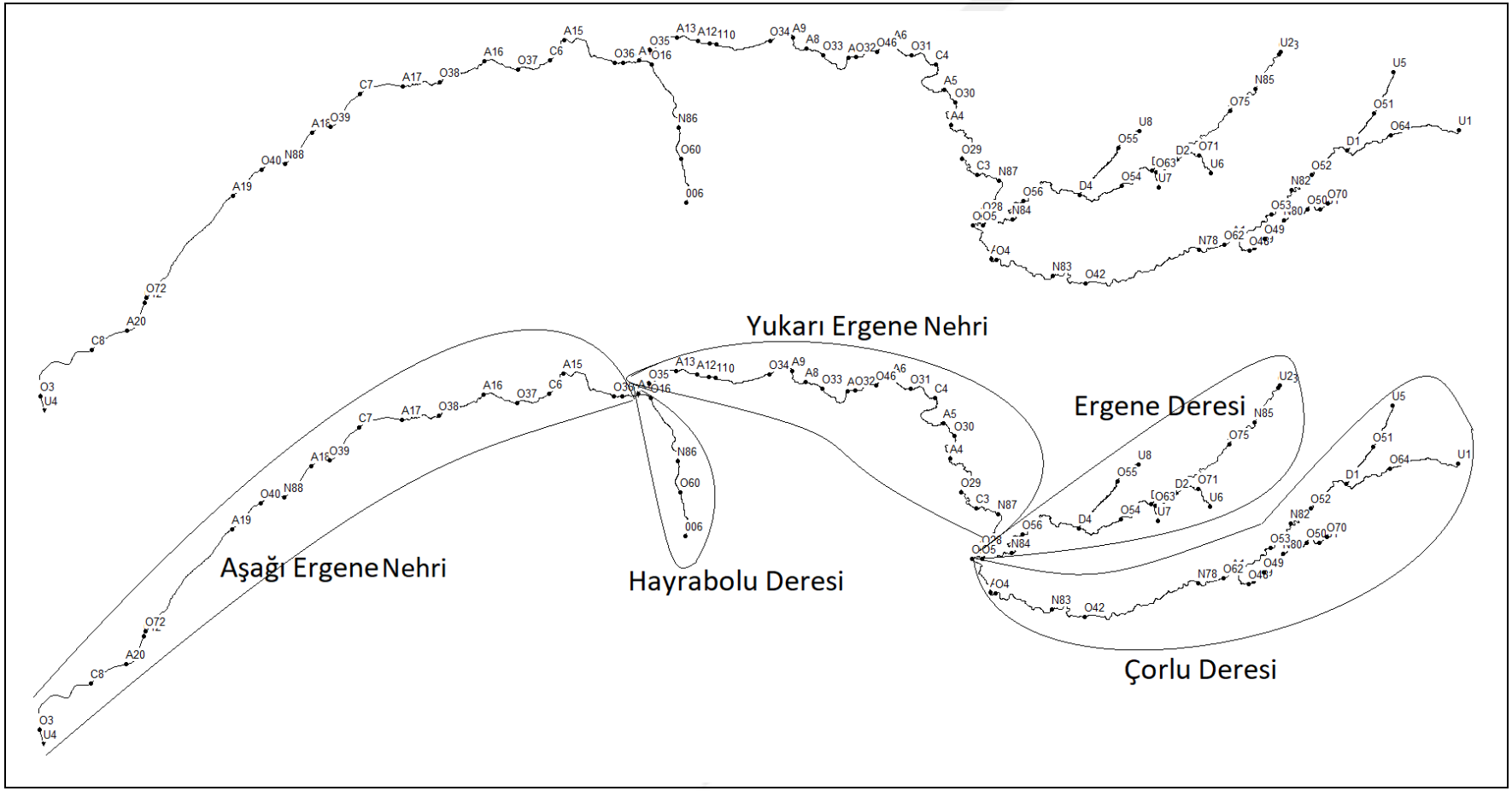
Şekil 4.23. Google Earth yardımı ile belirlenen Ergene Havzası akarsu ağı ve modellenen akarsu ağı

Modellenecek nehir kanalları ve düğümleri belirlendikten sonra WMS yazılımın sağladığı araçlar yardımı ile SWMM nehir kanalları ve düğüm noktaları oluşturulmuştur. Şekil 4.24'de SWMM arayüzünde görülen düğümler dört gruba ayrılabilir:

- Akım-enkesit ölçümlerinin yapıldığı her bir nokta bir düğüm noktası (“O” harfi ile başlayanlar) olarak tanımlanmıştır. Bu düğüm noktalarının işlevi enkesit ve boykesit verilerinin modele tanıtılmasıdır.
- Modellenecek akarsu kollarına yan kolların katıldığı noktalar birer düğüm noktası (“C”,”A”, ve “D” harfleri ile başlayanlar) olarak tanımlanmıştır. Bu düğüm noktalarının işlevi nehre su ve kirletici girdilerinin tanıtılmasıdır.
- Birinci gruptan iki düğüm noktası arasında akarsuya önemli bir yan kol katılımı yoksa, bu iki düğüm noktası arasına ek bir düğüm noktası (“N” harfi ile başlayanlar) tanımlanmıştır. Bu düğüm noktalarının işlevi hidrolik modelin çözünürlüğünün artırılmasıdır.
- Akarsu ağının her bir memba noktası bir düğüm (“U” harfi ile başlayanlar) noktası olarak tanımlanmıştır. (Akarsu ağının mansap noktası da U4 numarası ile çıkış noktası olarak tanımlanmıştır.)
- Nehir üzerindeki dört akım gözlem istasyonunu ifade eden düğümler Yenigörüce AGİ için 012, Lüleburgaz AGİ için 008, İnanlı AGİ için O28 (28 numaralı ölçüm noktası düğümü ve akım gözlem istasyonu aynı konumdadır) ve Hayrabolu AGİ için 006 isimleri ile adlandırılmışlardır.

Modelleme çalışmalarında “O” harfli düğümler ölçüm noktası düğümleri, geri kalan düğümler (C, A, D, N ve U harfleri ile başlayanlar) girdi düğümleri olarak anılacaktır. Aynı zamanda C, A, D ve U harfi ile başlayan düğümler proje çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen ve Bölüm 4.1.3’de anlatılan hidrolojik model alt-havza çıkış noktalarını ifade etmektedir. Hidrolojik modellerden elde edilen alt-havzalara ait akım verileri uzun dönem hidrolik modellere bu noktalardan girdi sağlamaktadır. Modellenen nehir ağı sonuçları daha anlaşılır yorumlayabilmeyi sağlamak amacıyla 5 temel bölüme ayrılmıştır.

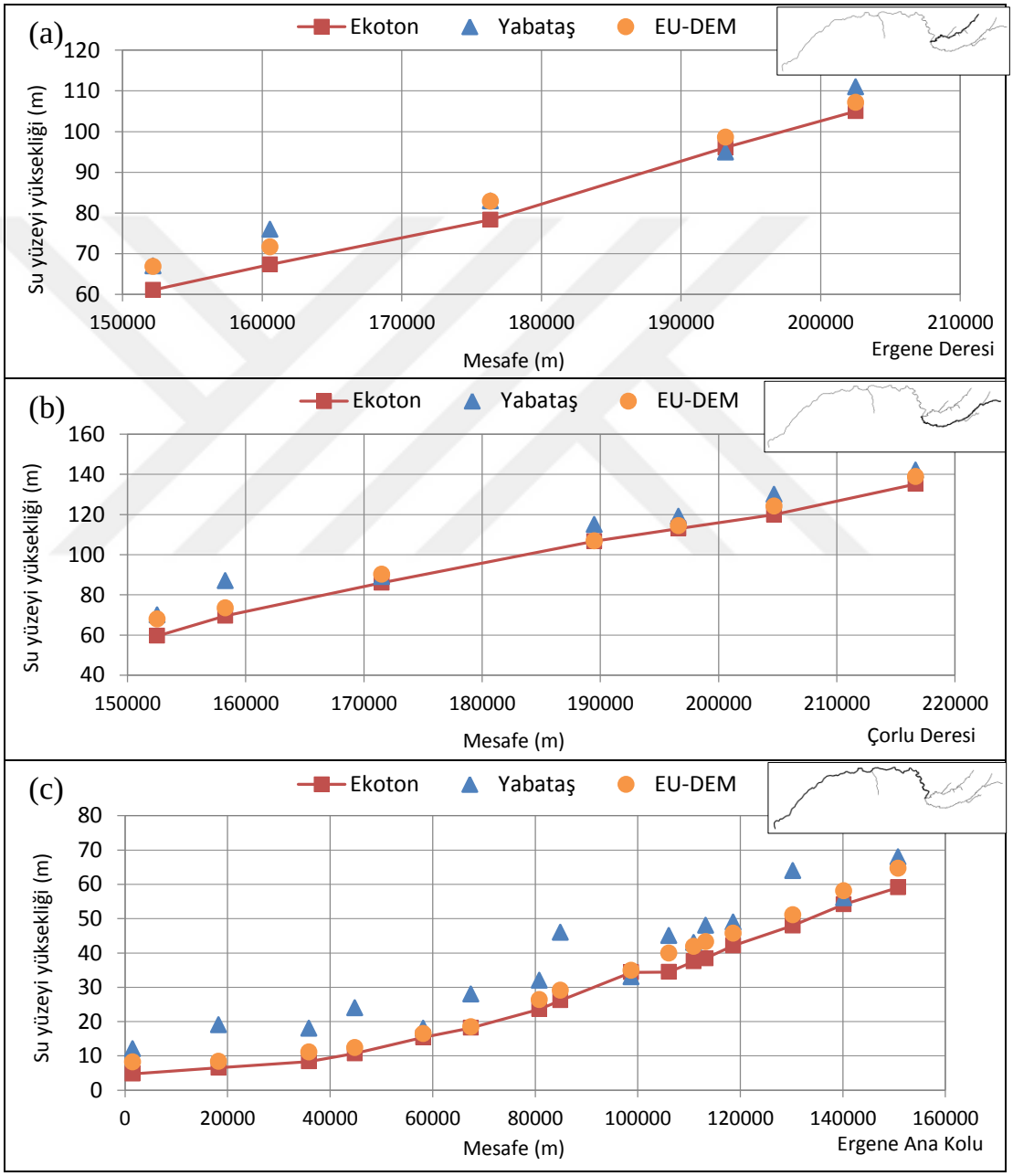
Şekil 4.24’den görülebileceği gibi U1-A3 düğümleri arasında kalan hat ve bu hatta dâhil olan yan kollar Çorlu Deresi olarak isimlendirilmektedir. U2-A3 hattı ve bu hatta dâhil olan yan kollar Ergene Deresi, A3-A5 hattı Yukarı Ergene Deresi, A5-U4 hattı Aşağı Ergene Deresi ve 006-A5 hattı Hayrabolu Deresi olarak isimlendirilmektedir. Tez içerisinde bazı kısımlarda Yukarı Ergene Deresi ve Aşağı Ergene Deresi birlikte Ergene Ana Kolu olarak anılmaktadır.



Şekil 4.24. Modellenen nehir ağının SWMM arayüzünde görünümü

4.2.2. Kanal eğimlerinin hesaplanması

Modellenecek kanal ağının oluşturulmasının ardından kanal eğimlerini doğru şekilde belirleyebilmek için eldeki veriler değerlendirilmiştir. EU-DEM yükselti verisinden, Ekoton ve Yabataş firmaları tarafından okunan su yüzeyi yükseklikleri ana nehir kolları boyunca Şekil 4.25'de karşılaştırılmıştır.

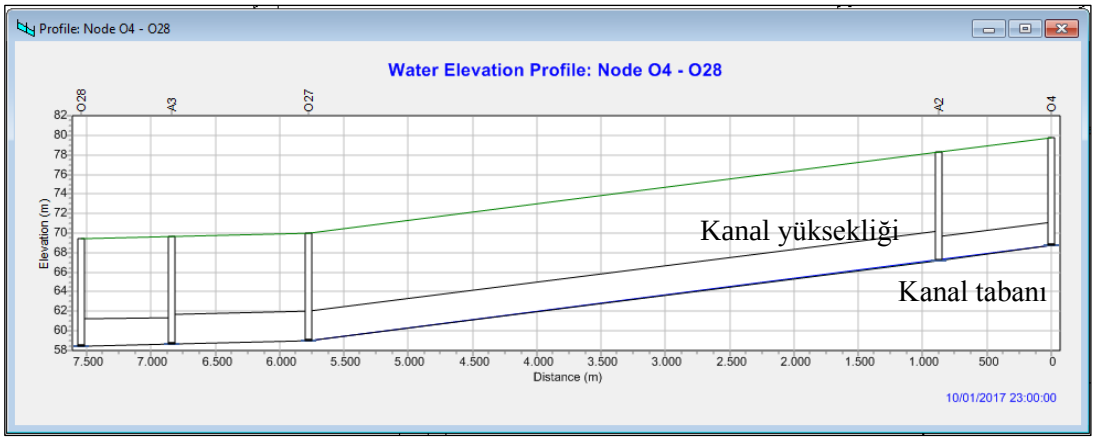


Şekil 4.25. Farklı kaynaklardan elde edilen su yüzeyi yüksekliği verilerinin ana nehir kolları boyunca karşılaştırılması, a) Ergene Deresi (151442. metre Çorlu Deresi ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (151442. metre Ergene Deresi ile birleşim noktasıdır.), c) Ergene Ana Kolu (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu ve 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Özellikle Şekil 4.25 (c)'de Ergene Nehri ana kolunda yükseltilerdeki farklılıklar nedeni ile eğimlerde meydana gelecek değişimler açık şekilde görülmektedir. EU-DEM ve Ekoton firmalarından elde edilen yükseklikler birbirine yakınken Yabataş firmasının yükseklik ölçümü yeterince hassas değildir. En-kesit değerleri için de Ekoton firmasının ölçüm verileri kullanılacağından yükseklik verisi olarak da Ekoton firması tarafından sağlanan değerlerin kullanılması uygun görülmüştür.

Kanal eğimlerinin belirlenebilmesi için her bir ölçüm noktasında ölçülen su derinliği okunan yükseklik değerinden çıkartılarak ölçüm noktalarındaki kanal taban yükseklikleri belirlenmiştir. Daha sonra ölçüm noktaları arasında kalan düğümlerin kanal taban yükseklikleri mesafeye göre doğrusal interpolasyon yapılarak hesaplanmıştır. Böylelikle her bir düğüm noktasının kanal taban yükseklikleri hesaplanmış ve kanal eğimleri belirlenmiştir.

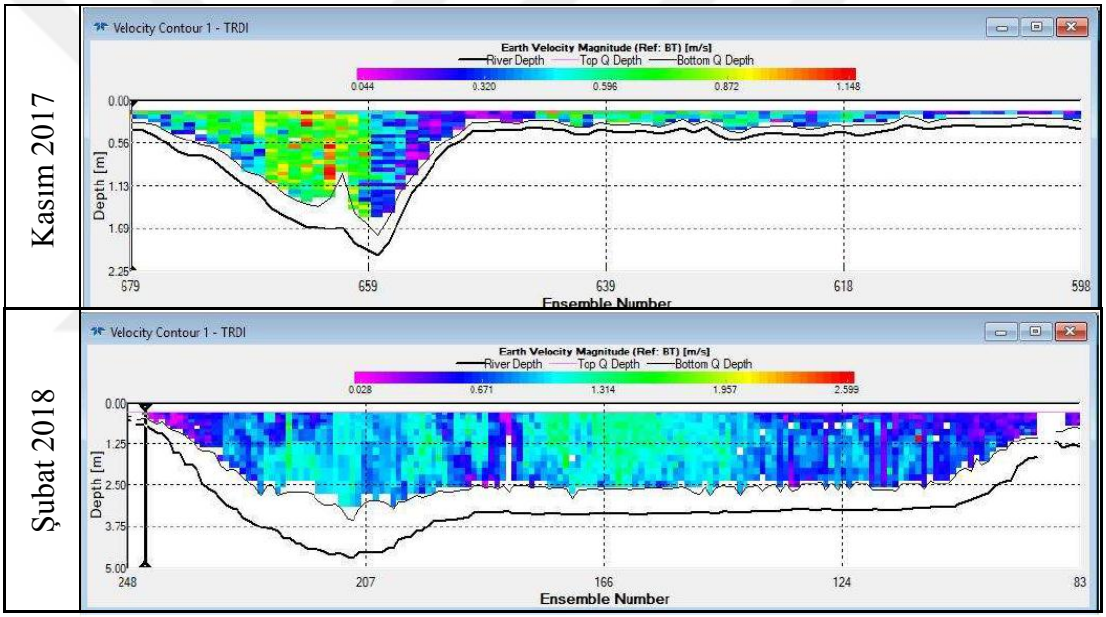
Şekil 4.26'da O4 ve O28 arasında kalan kanalların eğimi görülebilmektedir. O4, O27 ve O28, ölçüm noktalarını temsil eden düğümlerdir. Bu noktalarda ölçülen su yüzeyi yüksekliğinden ölçülen maksimum su derinliği çıkarıldıktan sonra elde edilen yükseklik akar kot yüksekliği olarak belirlenmiştir. Daha sonra A2 düğümünün akar kotunu bulmak için O4 ve O27 düğümlerinin akar kotları arasında interpolasyon yapılmıştır. "O" kodlu düğümler hariç tüm düğümlerin akar kotları bu şekilde belirlendiğinde tüm kanal eğimleri oluşmuştur.



Şekil 4.26. O4 ve O28 düğümleri arasında kalan kanalların SWMM arayüzünde gösterilmesi

4.2.3. Kanal en kesitlerinin belirlenmesi

SWMM de su kanallar içerisinde iletilmektedir. Kanalların enkesitlerinin gerçeğe olabildiğince yakın olması model sonuçlarını doğruluğu için gereklidir. Bu yüzden kanalların enkesiti olarak Ekoton firması tarafından saha ölçümlerinde elde edilen enkesitler kullanılmıştır (EKOTON, 2017; EKOTON, 2018). Kasım 2017 ve Şubat 2018 döneminde 38 ölçüm noktası için alınan enkesitlerden bazıları hava şartlarındaki olumsuzluklar ve ölçümdeki hatalar nedeni ile iki dönemde aynı noktadan alınamamıştır. Ayrıca Şubat 2018 döneminde yağış ve kar erimesi gibi nedenlerle çok daha büyük enkesitler gözlemlenmiştir. Bu farklılık 40 numaralı ölçüm noktası için Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

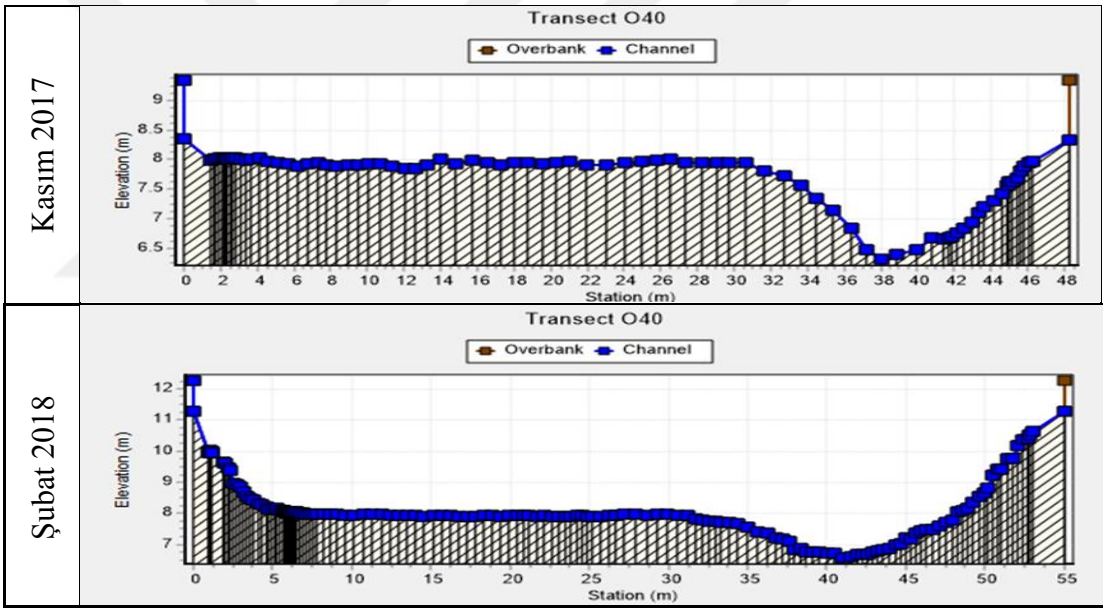


Şekil 4.27. 40 numaralı ölçüm noktası için ADCP ile belirlenen akış enkesiti ve hız dağılımı (EKOTON, 2017; EKOTON, 2018)

Bu farklılık nedeniyle Kasım 2017 ve Şubat 2018 modellerinde kendi dönemlerine ait enkesitler kullanılmıştır. Enkesit atamalarında iki istisnai ölçüm noktası vardır. Bunlardan ilki 51 numaralı ölçüm noktasıdır. 51 numaralı ölçüm noktası insan yapımı bir kanal olduğundan bu kanal enkesiti iki dönem için aynıdır. İkincisi 70 numaralı ölçüm noktasıdır. 70 numaralı ölçüm noktası bir gölet çıkışına denk geldiği için Kasım 2017 döneminde göletten su çıkışının olduğu bir kanal gözlenmemiştir. Ancak Şubat 2018 döneminde göletin taşarak bir kanala ulaştığı tespit edilip bu noktada enkesit ölçümü yapılmış ve iki dönem için Şubat 2018 döneminde çıkartılan

enkesit kullanılmıştır. Uzun dönem modellerinde ise bölümün ilerleyen kısımlarında anlatıldığı üzere Şubat 2018 döneminde elde edilen enkesitler düzenlenerek kullanılmıştır.

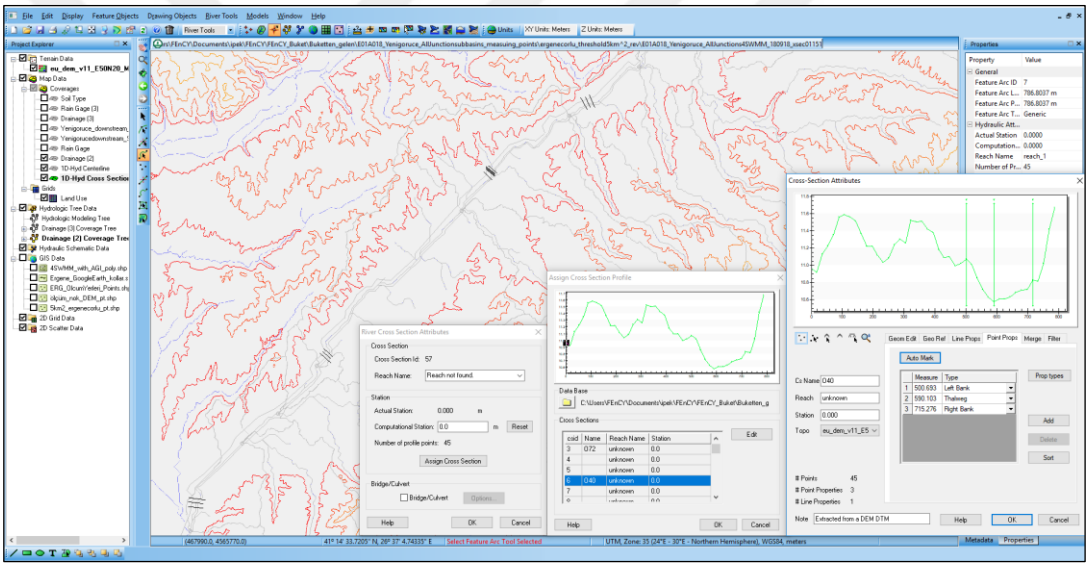
Enkesitler, ölçüm noktalarına karşılık gelen düğümlerde (SWMM arayüzünde "O" harfi ile ifade edilen düğümler) ölçülmüştür. Ancak SWMM arayüzünde enkesitler kanalların bir özelliği olarak tanımlandığından, bir noktada alınan enkesit o noktanın altındaki ve üstündeki kanal için tanımlanarak "O" harfli düğümler aynı enkesite sahip iki kanal arasında kalan birer nokta olarak ifade edilmiştir. Tüm "O" harfli düğümlerin altındaki ve üstündeki kanallar için bu işlem yapılmıştır. 40 numaralı ölçüm noktasına ait enkesitin Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemleri için SWMM arayüzünde görünümü Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. 40 numaralı ölçüm noktasının enkesitinin SWMM arayüzünde görünümü

"O" harfli düğümlerin altında ve üstünde kalan kanallar tüm kanalları kapsamamaktadır. Bu kanalların dışında kalan kanallara "yetim kanal" adı verilmiş, ve bu kanalların enkesitleri projenin diğer paydaşı olan Pamukkale Üniversitesi tarafından Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği tarafından geliştirilen HEC-RAS modeli kullanılarak belirlenmiştir. HEC-RAS yetim kanalların altında ve üstünde kalan kanalların enkesitleri arasında interpolasyon işlemi yaparak bu kanallar için uygun enkesit bilgisini sağlamıştır. Böylelikle tüm kanalların enkesitleri belirlenmiştir.

Uzun dönem modelinde şubat ayında gözlenen akımlardan çok daha büyük akımlar mevcuttur. Şubat 2018 enkesitleri ne kadar büyük olsa da daha büyük akımları ya da taşkın durumunda meydana gelecek akımları karşılaması imkânsızdır. Bu nedenle Şubat enkesitlerinin sağa ve sola taşkın seddesini ifade edebilmek için belli eğimlerle uzatılmasına karar verilmiştir. Kanalların sağ ve sol sahil eğimleri Bölüm 4.1.1'de anlatıldığı şekilde oluşturulan sayısal yükseklik modeli ile belirlenmiştir. WMS arayüzünde ölçüm noktalarına yakın koordinatlarda enkesit okuması yapılmış ve Ergene Deresi, Çorlu Deresi, Hayrabolu Deresi, Yukarı Ergene Nehri, Aşağı Ergene Nehri boyunca ve küçük yan kollar için sağ ve sol sahil eğimleri belirlenmiştir. Şekil 4.29'da 40 numaralı gözlem noktası için WMS arayüzünde enkesit çıkarılması işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.29. 40 numaralı ölçüm noktası için WMS arayüzünde enkesit çıkarılması işlemi

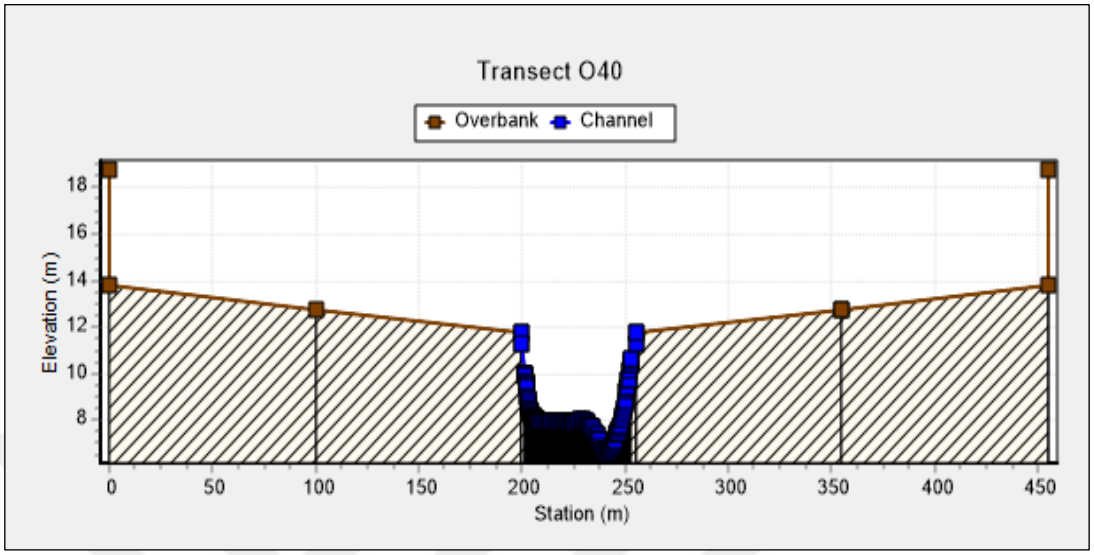
Bu şekilde 36 ölçüm noktası (51 ve 70 numaralı ölçüm noktaları hariç) için sağ ve sol sahil eğimleri çıkarıldıktan sonra nehir Ergene Deresi, Çorlu Deresi, Hayrabolu Deresi, Yukarı Ergene Nehri, Aşağı Ergene Nehri ve küçük yan kollar olmak üzere parçalara ayrılmıştır. Bu parçalar ve isimleri Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Her bir parçaya ait tek bir eğim değeri belirlenmesi hedeflenerek parçaların kapsadığı ölçüm noktalarının sağ ve sol sahil eğimlerinin kendi aralarında ortalamaları alındı. Daha sonra hesaplanan sağ ve sol ortalama sahil eğimlerinin de kendi aralarında ortalamaları alınarak her bir parça için tek bir eğim değeri belirlenmiş oldu. Bu eğim değerleri Tablo 4.6 gösterilmektedir.

Tablo 4.6. Ölçüm noktaları için WMS arayüzü ile okunan sağ ve sol sahil eğimleri ile belirlenen ortalama nehir kolu eğimleri

	Ölçüm Noktası	Sol Eğim	Sağ Eğim	Sol Eğim Ortalamaları	Sağ Eğim Ortalamaları	Ortalama Eğim
Aşağı Ergene Nehri	3	0,014	0,009	0,010	0,011	0,010
	72	0,014	0,006			
	40	0,006	0,002			
	39	0,009	0,004			
	38	0,009	0,019			
	37	0,009	0,025			
	36	0,009	0,008			
Yukarı Ergene Nehri	35	0,010	0,006	0,020	0,023	0,021
	34	0,010	0,006			
	33	0,011	0,011			
	32	0,011	0,009			
	46	0,013	0,011			
	31	0,017	0,084			
	30	0,017	0,034			
	29	0,062	0,006			
	28	0,027	0,035			
Çorlu Deresi	27	0,143	0,032	0,048	0,027	0,038
	4	0,030	0,030			
	42	0,045	0,019			
	62	0,023	0,030			
	53	0,033	0,014			
	52	0,019	0,031			
	64	0,046	0,030			
Ergene Deresi	5	0,025	0,029	0,027	0,021	0,024
	56	0,045	0,028			
	54	0,029	0,023			
	75	0,026	0,017			
	43	0,007	0,007			
Çorlu Deresi Yan Kol	48	0,007	0,040	0,037	0,056	0,046
	49	0,051	0,067			
	50	0,051	0,061			
Ergene Deresi Yan Kol	55	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
	63	0,024	0,009	0,024	0,009	0,016
	71	0,043	0,066	0,043	0,066	0,054
Hayrabolu Deresi	16	0,004	0,002	0,011	0,004	0,007
	60	0,017	0,006			

Hesaplanan eğim değerleri ile Şubat 2018 modelinde kullanılan tüm kanalların taşkın seddeleri, çok yüksek sel akışlarını dahi taşıyabilmelerini sağlamak amacıyla sağa ve sola 200 m ve yukarı doğru 4 m olacak şekilde uzatılmıştır. Örnek olarak 40 numaralı ölçüm noktası için taşkın seddesinin kanal enkesitine eklemlenmesi sonucu

ortaya çıkan enkesit görüntüsü Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Uzun dönem modeller için tüm kanal enkesitleri bu şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4.30. 40 numaralı ölçüm noktası için uzun dönem modelinde kullanılan enkesit görüntüsü

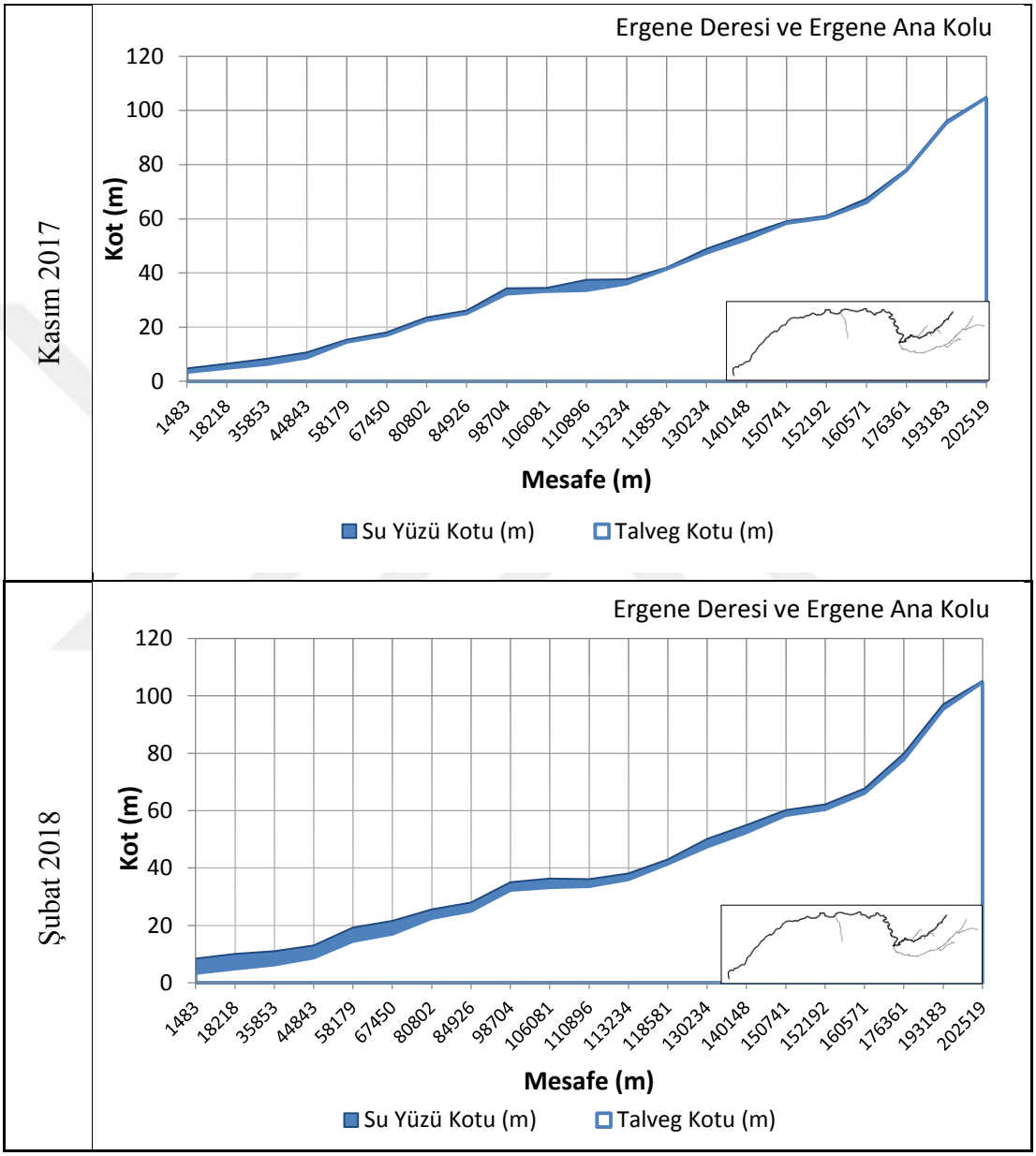
4.2.4. Kanalların pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi

SWMM'de kanallar boyunca kararsız değişken su yüzeyi profillerinin elde edilmesi işlemi St. Venant denklemleri olarak bilinen kütle ve momentum korunumu denklemlerinin (sırasıyla Denklem (1.3) ve Denklem (1.4)) sayısal olarak çözülmesiyle yapılmaktadır. Momentum korunumu denklemindeki enerji çizgisi eğimi, S_f, kararlı düzenli akışı modellemek için kullanılan Manning denklemi ile Denklem (4.3) ile ifade edilir;

$$S_f = n^2 \frac{Q|U|}{AR^{4/3}} \tag{4.3}$$

Burada n Manning pürüzlülük katsayısı, R akış enkesitinin hidrolik yarıçapı, U akış hızıdır ve *Q*/A'ya eşittir. Kütle ve momentum korunumu denklemlerinin çözülebilmesi için kanalların Manning pürüzlülük katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Manning pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi için literatürde birçok yöntem ve kanal malzemesine göre değişen çeşitli değerler sunulmuştur (Chow, 1959).

Saha çalışmalarının tamamlanmasının ardından ölçüm yapılan tüm enkesitler için minimum talveg kotları ve maksimum su derinlikleri kullanılarak su yüzü profilleri elde edilmiştir. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu için elde edilen su yüzü profilleri Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu için Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerine ait su yüzü profilleri (151442. m Çorlu Deresi ile Ergene Deresi'nin kavuşma noktasıdır.)

Görüleceği gibi iki dönemde de farklı akış kollarının tümünde düzensiz akım profili gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak ilgili ölçüm noktalarında düzenli akımlarda olduğu gibi debi ve enkesit özellikleri kullanılarak Manning pürüzlülük

katsayılarının kalibrasyonunun mümkün olmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle modelleme çalışmaları boyunca kanalların Manning pürüzlülük katsayılarının belirlenebilmesi için farklı yöntemler denenmiştir. Bu yöntemler tüm kanallar için literatürden sabit bir pürüzlülük katsayısı seçimi (Bölüm 4.2.4.1), Cowan Yöntemi ile pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi (Bölüm 4.2.4.2) ve saha ölçümleri kullanılarak su hızına ve derinliğe göre aynı anda kalibrasyon işlemi yapılması sonucu pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi (Bölüm 4.2.4.3) olup Tablo 4.7' de listelenmiştir.

Tablo 4.7. Kanallar için belirlenen farklı pürüzlülük katsayısı setleri

A	Chow(1956)'un önerdiği sabit bir Manning n pürüzlülük katsayısı, 0,030
B	Chow(1956)'un önerdiği sabit bir Manning n pürüzlülük katsayısı, 0,035
C	Chow(1956)'un önerdiği sabit bir Manning n pürüzlülük katsayısı, 0,040
D	Ağustos verileri kullanılarak Cowan yöntemi ile belirlenen Manning pürüzlülük katsayıları
E	Kasım verileri kullanılarak Cowan yöntemi ile belirlenen Manning pürüzlülük katsayıları
F	Kasım ayı saha ölçümleri kullanılarak su yüksekliğine ve hızına göre kalibre edilen Manning pürüzlülük katsayıları (Kargı, 2019)
G	Şubat ayı saha ölçümleri kullanılarak su yüksekliğine ve hızına göre kalibre edilen Manning pürüzlülük katsayıları (Kargı, 2019)
H	Lüleburgaz AGİ'ye kadar G yöntemi ile belirlenmiş değerlerin, Lüleburgaz AGİ'den sonra E yöntemi ile belirlenen değerlerin kullanılması

Tablo 4.7'de listelenen yöntemler sonucu belirlenen pürüzlülük katsayısı değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir. Bu değerlerden hangilerinin modellenen kollar için en uygun değerler olduğuna Bölüm 4.4'de anlatılan uzun dönem hidrolik modelleme çalışmaları sonucu karar verilmiştir. Sonuç olarak Tablo 4.8'de H kodu ile ifade edilen "Lüleburgaz AGİ'ye kadar G yöntemi ile belirlenmiş değerlerin, Lüleburgaz AGİ'den sonra E yöntemi ile belirlenen değerlerin kullanılması"na karar verilmiştir. Bu şekilde belirlenen pürüzlülük katsayısı değerleri Tablo 4.8'de H sütununda verilmiştir.

Tablo 4.8. Farklı yöntemler ile belirlenen Manning pürüzlülük katsayıları

	Manning pürüzlülük katsayısı							
Ölçüm noktası	A	B	C	D	E	F	G	H
3	0,030	0,035	0,040	0,058	0,044	0,055	0,046	0,044
4	0,030	0,035	0,040	0,046	0,052	0,046	0,024	0,024
5	0,030	0,035	0,040	0,052	0,046	0,025	0,020	0,020
16	0,030	0,035	0,040	0,063	0,070	0,020	0,032	0,070
27	0,030	0,035	0,040	0,046	0,059	0,015	0,023	0,023
28	0,030	0,035	0,040	0,111	0,052	0,011	0,023	0,023
29	0,030	0,035	0,040	0,085	0,059	0,060	0,041	0,041
30	0,030	0,035	0,040	0,063	0,065	0,013	0,040	0,040
31	0,030	0,035	0,040	0,063	0,059	0,016	0,025	0,025
32	0,030	0,035	0,040	0,052	0,058	0,100	0,021	0,021
33	0,030	0,035	0,040	0,052	0,045	0,002	0,042	0,045
34	0,030	0,035	0,040	0,063	0,063	0,080	0,027	0,063
35	0,030	0,035	0,040	0,075	0,050	0,022	0,051	0,050
36	0,030	0,035	0,040	0,065	0,050	0,013	0,028	0,050
37	0,030	0,035	0,040	0,045	0,075	0,020	0,021	0,075
38	0,030	0,035	0,040	0,045	0,075	0,010	0,031	0,075
39	0,030	0,035	0,040	0,040	0,040	0,065	0,017	0,040
40	0,030	0,035	0,040	0,050	0,050	0,020	0,021	0,050
42	0,030	0,035	0,040	0,046	0,058	0,110	0,050	0,050
43	0,030	0,035	0,040	0,102	0,049	0,010	0,018	0,018
46	0,030	0,035	0,040	0,081	0,065	0,011	0,011	0,011
48	0,030	0,035	0,040	0,063	0,040	0,067	0,042	0,042
49	0,030	0,035	0,040	0,070	0,085	0,045	0,016	0,016
50	0,030	0,035	0,040	0,137	0,058	0,022	0,025	0,025
51	0,030	0,035	0,040	0,050	0,049	-	0,013	0,013
52	0,030	0,035	0,040	0,058	0,052	0,021	0,020	0,020
53	0,030	0,035	0,040	0,052	0,063	0,026	0,034	0,034
54	0,030	0,035	0,040	0,069	0,063	0,020	0,014	0,014
55	0,030	0,035	0,040	0,063	0,052	0,040	0,065	0,065
56	0,030	0,035	0,040	0,052	0,065	0,027	0,024	0,024
60	0,030	0,035	0,040	0,069	0,050	0,017	0,063	0,050
62	0,030	0,035	0,040	0,063	0,056	0,058	0,050	0,050
63	0,030	0,035	0,040	0,075	0,081	0,150	0,110	0,110
64	0,030	0,035	0,040	0,040	0,058	0,095	0,029	0,029
71	0,030	0,035	0,040	0,121	0,124	0,120	0,065	0,065
72	0,030	0,035	0,040	0,085	0,040	0,010	0,014	0,040
75	0,030	0,035	0,040	0,045	0,075	0,023	0,061	0,061
70	0,030	0,035	0,040	0,069	0,058	-	0,045	0,045

Böylelikle Manning pürüzlülük katsayıları, enkesitlerin belirlenmesi işleminde (Bölüm 4.2.3) olduğu gibi ölçüm noktası düğümlerinin (SWMM arayüzünde "O" harfi ile ifade edilen düğümler) altında ve üstünde kalan kanallar için Tablo 4.7'de listelenen yöntemlerle belirlenmiştir. Yetim kanallar olarak adlandırılan ("O" harfli düğümlerin altında ve üstünde kalan kanallar hariç diğer kanallar) kanalların Manning pürüzlülük katsayıları ise interpolasyon işlemi yapılarak belirlenmiştir.

4.2.4.1. Literatürden pürüzlülük katsayısı seçimi

Manning pürüzlülük katsayılarının belirlenmesinde bir yöntem tüm kanallar için Chow (1956) tarafından önerilen pürüzlülük katsayısı değerleri tablosundan sabit bir n değerinin seçimidir. Chow (1956) tarafından önerilen tabloda doğal küçük nehirler (taşkın döneminde kanal üst genişliği 30,5 metreyi aşmayan nehirler), büyük nehirler için (taşkın evresinde kanal üst genişliği 30,5 metreyi aşan nehirler) ve taşkın yatakları için çeşitli pürüzlülük katsayısı değerleri bulunmaktadır.

Proje kapsamında Kasım 2017 ve Şubat 2018 döneminde enkesit ölçümleri yapıldığından kanal üst genişlikleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. İki dönem için ölçülen kanal üst genişlikleri Ek-1'de verilmiştir. Şubat 2018 döneminde gerçekleştirilen ölçümler taşkın dönemine denk gelmiştir. Bu dönemde alınan ölçümler sonucu Ergene Nehri Ana Kolu üzerindeki ölçüm noktalarının çoğunda kanal üst genişliklerinin 30,5 metreyi aştığı gözlemlenmiştir. Ergene Deresi üzerinde 1 ve Çorlu Deresi üzerinde 2 noktada kanal üst genişlikleri 30,5 metreyi aşmaktadır. Kasım 2017 döneminde ise sadece nehrin Aşağı Ergene Nehri kısmındaki ölçüm noktalarında kanal üst genişlikleri 30,5 metreyi aşmaktadır. Bu bilgiler ışığında Ergene Nehri Ana Kolunun taşkın dönemlerinde büyük nehirler kategorisine girdiği söylenebilir. Ancak Ergene ve Çorlu Dereleri için bunu söylemek doğru olmayacaktır. Ergene Nehri'nin önemli kısmının büyük nehirler kategorisine girdiği varsayımı ile tüm kanallar için Chow (1956)'un tablosundan büyük nehirler için tavsiye edilen pürüzlülük katsayısı değerlerinden (0,025-0,100) 0,030, 0,035 ve 0,040 değeri seçilmiştir (Tablo 4.8'de sırasıyla A, B ve C sütunları). Bu pürüzlülük katsayısı değerleri ile Bölüm 4.4.1'de yer alan 71 Alt-havzalı Hidrolik Model çalıştırılmış ve model doğruluğuna etkileri aynı bölümde incelenmiştir.

4.2.4.2. Cowan yöntemi

Cowan (1956) açık kanallarda Manning pürüzlülük katsayısını tahmin edebilmek için bir yöntem önemiştir. Denklem (4.4)'de verilen formül, Manning pürüzlülük katsayısını (n) çeşitli faktörlerin etkisini göz önüne alarak belirlemeye imkan vermektedir;

$$n = \left(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4\right) m \tag{4.4}$$

Burada n Manning pürüzlülük katsayısı, n_0 kanal malzemesinin yapısı, n_1 kanal malzemesinin düzensizlik derecesi, n_2 enkesitteki değişim durumu, n_3 kanal içerisindeki kolon, köprü ayağı gibi yapıların varlığının etkisi, n_4 kanaldaki bitki örtüsünün durumu ve m kanalın kıvrımlılık derecesidir.

Tablo 4.9. Cowan yöntemi (Cowan, 1956) ile pürüzlülük katsayısının hesaplanması için önerilen parametre değerleri (Chow, 1959)

Kanal koşulları		Değerler	
Malzeme içeriği	Toprak	n_0	0,020
	Kaya		0,025
	Kum		0,024
	Çakıl		0,028
Düzensizlik derecesi	Düzenli	n_1	0,000
	Az		0,005
	Orta		0,010
	Şiddetli		0,020
Kanal enkesitindeki değişim	Kademeli	n_2	0,000
	Ara sıra değişen		0,005
	Sık değişen		0,010-0,015
Engellerin göreceli etkisi	İhmal edilebilir	n_3	0,000
	Az		0,010-0,015
	Kabul edileblilir		0,020-0,030
	Şiddetli		0,040-0,060
Bitki örtüsü	Düşük	n_4	0,005-0,010
	Orta		0,010-0,025
	Yüksek		0,025-0,050
	Çok yüksek		0,050-0,100
Kıvrımlılık derecesi	Az	m	1,000
	Kabul edileblilir		1,150
	Şiddetli		1,300

Denklem (4.4)'ün çözümü için gereken parametrelere ait değerler Tablo 4.9'da verilmiştir. Bu yöntem pürüzlülük katsayısına etki eden çok sayıda faktörü hesaplamaya dahil etse de öznel bir yöntem olduğundan sonuçlar araştırmacının

tecrübe ve bilgisi ile ilişkilidir. Yöntem herhangi bir ölçüm gerektirmeden ortamın göz ile incelenerek değerlerin kestirimini mümkün kıldığından kullanışlıdır. Bu yöntemin Ergene Nehri'ne uygulanmasında saha ölçümlerinden elde edilen ölçüm noktası fotoğrafları ve ölçüm alan kişiler tarafından anlık doldurulan hidromorfolojik durum gözlem raporları kullanılmıştır (Ek-2). Bu yöntemle pürüzlülük katsayılarının tahmini Ağustos 2017 ve Kasım 2017 dönemi için gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu dönemlerde kanallar içerisinde az su olduğundan kanal enkesiti hakkında fikir yürütebilmek mümkün olmuştur. Hidromorfolojik durum gözlem raporları sadece Kasım 2017 dönemi için var olduğundan bu dönem için tahmin edilen değerlerin güvenilirliği daha fazladır. Ağustos 2017 ve Kasım 2017 dönemi için ölçüm noktaları için tahmin edilen Manning pürüzlülük katsayıları Tablo 4.8'de sırasıyla D ve E sütunlarında verilmiştir. Bu pürüzlülük katsayısı değerleri ile Bölüm 4.4.1'de yer alan 71 Alt-havzalı Hidrolik Model çalıştırılmış ve model doğruluğuna etkileri aynı bölümde incelenmiştir.

4.2.4.3. Hız ve derinlik değerlerine göre kalibrasyon

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y064 numaralı proje kapsamında projenin bir diğer ortağı olan Pamukkale Üniversitesi modelleme grubu tarafından Ergene Nehri'nin SWMM ile hidrolik modellenmesi ile eş zamanlı olarak HEC-RAS ile hidrolik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Kargı, 2019). HEC-RAS ile modelleme çalışmaları kapsamında kalibrasyon parametresi olarak Manning pürüzlülük katsayısı (n) kullanılmış ve her bir ölçüm noktasında saha ölçümleri ile model sonuçları birbirine uyacak şekilde n değerleri belirlenmiştir. Bu işlem Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her bir ölçüm noktası için sahada ölçülen ve model tarafından hesaplanan su seviyesi ve ortalama hız değerleri arasındaki hata eş zamanlı minimize edilecek şekilde model kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda el ile kalibrasyon işlemi yapılırken her bir ölçüm noktasında yapılan farklı denemeler için Denklem (4.5)'de verilen amaç fonksiyonunun minimum değere yaklaştırılması amaçlanmıştır.

$$z_i = \min\left\{\frac{\left|\tilde{h}_i + h_i\right|}{\tilde{h}_i} + \frac{\left|\tilde{v}_i + v_i\right|}{\tilde{v}_i}\right\} \times 100 \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \ldots 38 \tag{4.5}$$

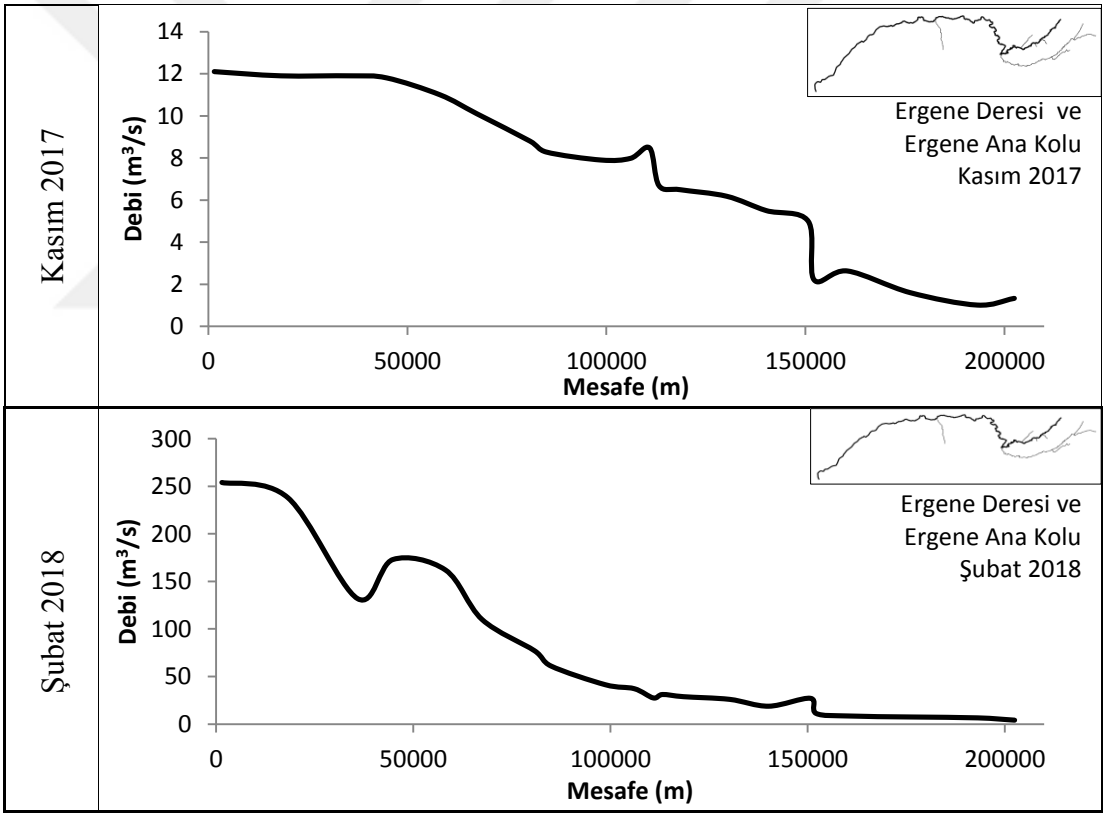
burada $\bar{h}_i$ ve $\bar{v}_i$ saha çalışması sonucunda i numaralı enkesitte ölçülen su yüksekliği ve hız değerini, h_i ve v_i ise model sonucu i numaralı enkesitte tahmin edilen su yüksekliği ve hız değerini göstermektedir. Denklem (4.5)'den görüleceği gibi kalibrasyon aşamasında tüm enkesit noktalarında ölçülen ve hesaplanan hız değerleri arasında hesaplanan yüzde bağıl mutlak hata değerlerinin toplamı minimize edilecek şekilde kalibrasyon işlemi yapılmaktadır. Bu kapsamda kalibrasyon işlemi yapılmış ve Manning pürüzlülük katsayısı (n) değerleri akım kolları boyunca belirlenmiştir. Bu kapsamda her bir ölçüm noktası için Kasım 2017 döneminde sahada ölçülen ve kalibre edilmiş HEC-RAS modeli tarafından hesaplanan su yüksekliği ve ortalama hız değerlerinin korelasyonu sırasıyla, 0,89 ve 0,65'tir. Şubat 2018 döneminde ise bu değerler sırasıyla 0,98 ve 0,91'dir. Şubat ayında saha ölçümleri ve kalibre edilmiş değerler arasında daha yüksek bir benzerlik yakalanmıştır. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemleri için kalibrasyon sonucu pürüzlülük katsayılarının belirlenmesi işlemi Tablo 4.7'de sırasıyla F ve G kodu ile ifade edilmiştir. Bu şekilde belirlenen pürüzlülük katsayısı değerleri Tablo 4.8'de F ve G sütunlarında verilmiştir. Bu pürüzlülük katsayısı değerleri ile Bölüm 4.4.1'de yer alan 71 Alt-havzalı Hidrolik Model çalıştırılmış ve model doğruluğuna etkileri aynı bölümde incelenmiştir.

4.3. Kararlı Durum Hidrolik Modelleri

Ergene Nehri için oluşturulacak modelin geometrik özelliklerinin ve kullanılacak pürüzlülük katsayılarının belirlenmesinin ardından kararlı durum hidrolik modellerinin oluşturulması çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Bu modeller ölçüm dönemini temsil eden modeller olup bu dönem için Ergene Nehri üzerinde ölçüm noktaları dışında kalan noktalardaki akım, derinlik ve hız parametrelerinin tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. "Kasım 2017 Hidrolik Modeli" ve "Şubat 2018 Hidrolik Modeli" olmak üzere 2 model üretilmiştir. Ayrıca Bölüm 5.2'de anlatılan kararlı durum kirletici taşınım modelleri bu modellere dayanmaktadır.

Kararlı durum su kalitesi modellerinin dayanacağı hidrolik modelin oluşturulması için her bir düğüm noktasından akarsu kanallarına girecek su miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada, saha ölçümleri ile elde edilen debi verilerini kullanarak nehre farklı noktalardan giren su miktarı bilgisini elde etmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Şekil 4.32'de görüldüğü üzere her iki ölçüm döneminde de

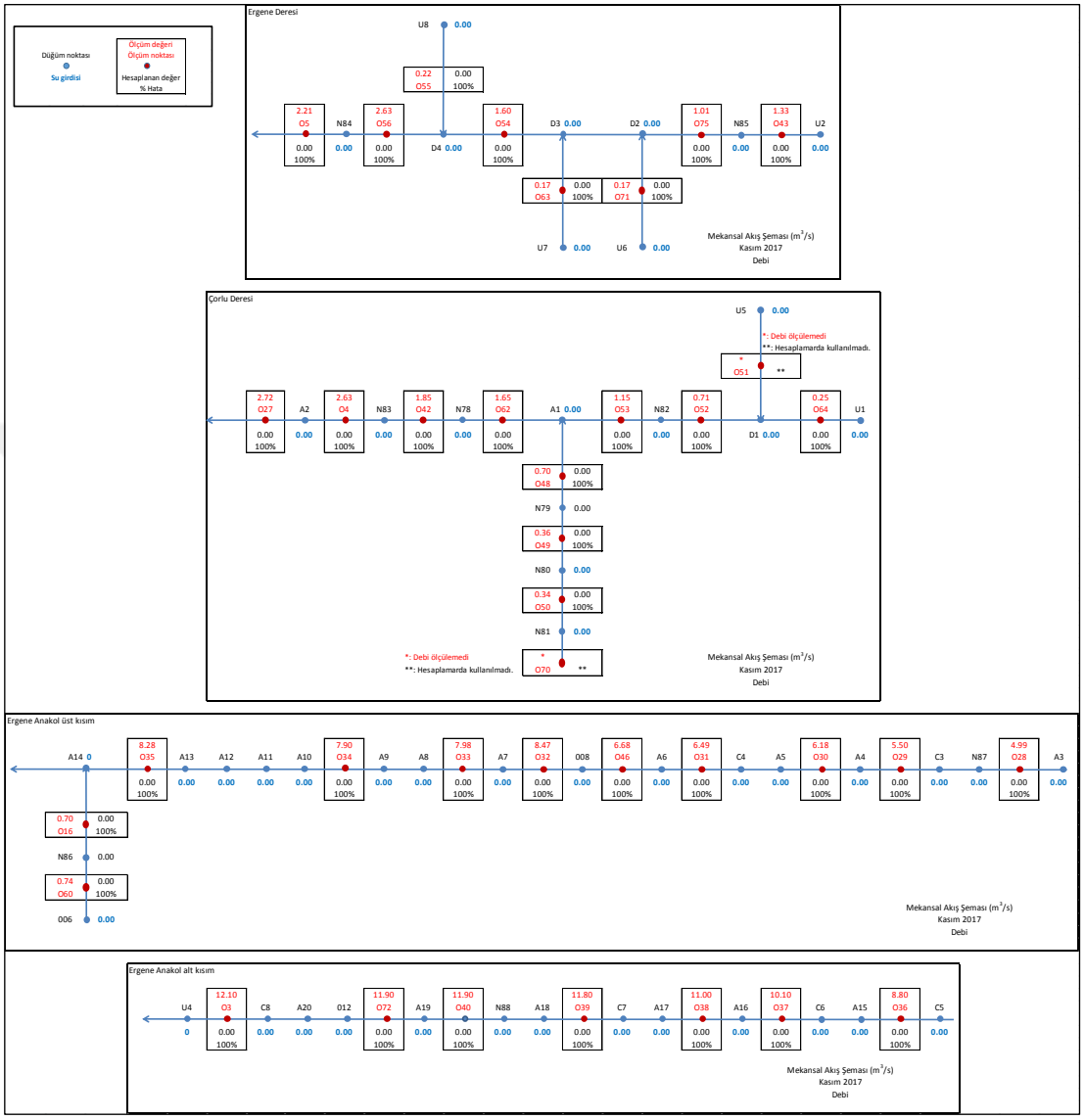
membadan mansaba doğru debi değerleri genel olarak artış eğilimindedir. Ancak bu artış sürekli ve monoton değildir. Ölçülmüş debi değerlerinde membadan mansaba giderken görülen bu dalgalanmaların (Şekil 4.32) nedenleri ölçüm hataları ya da anlık ölçümlere kısa süreli debi varyasyonlarının yansıması olabilir (Modellenen akarsu kollarında, nehir içinden önemli miktarda su çekimi olmadığı varsayılmıştır.). Oluşturulacak kararlı durum modellerinin bu dalgalanmalardan arındırılması gerekmektedir. Aksi takdirde modellerin temsil kabiliyeti azalacaktır. Bu nedenle, ölçüm verileri kullanılarak nehre su girdileri belirlenirken Şekil 4.32'deki debi değerlerinin doğrudan kullanılması yerine, bu değerlere en yakın sonucu verecek ancak membadan mansaba doğru monoton bir debi artışı sağlayacak su girdisi değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.32. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca ölçülmüş debi değerleri (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır)

Nehre farklı noktalardan su girdilerinin belirlenmesi bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Akım optimizasyon probleminin Excel'e tanıtılması için Mekânsal Akış Şemaları olarak adlandırdığımız takip şemaları oluşturulmuştur. Bu

Mekânsal Akış Şeması'nın bir örneği Kasım 2017 dönemi için Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.33. Kasım 2017 dönemi için oluşturulan Mekânsal Akış Şeması

Şekil 4.33'de verilen Mekânsal Akış Şemasında modellenen akarsu ağı üzerindeki düğüm noktalarının birbirlerine göre konumları belirtilmiştir. "O" harfi ile ifade edilen düğümler ölçüm noktalarını ifade eden düğümlerdir. Bu noktalarda ölçülen debi değerleri ve optimizasyon sonucu oluşacak debi değerleri arasındaki yüzde bağıl hatalar belirtilmiştir. Ölçüm noktaları debi, hız, derinlik ve konsantrasyon parametrelerinin okunacağı düğümlerdir dolayısıyla bu düğümlerden su girişi olmayacaktır. Nehre su girdilerinin olacağı düğümler ölçüm noktaları düğümleri arasında kalan düğümler (girdi düğümleri) olacaktır. Girdi düğümü olabilecek

düğümler 51 adettir. Bu kapsamda optimizasyon problemi Excel üzerinde, girdi düğümlerinden giren akım değerleri akış aşağı toplanarak ölçüm noktası düğümlerinde okunan akım değerlerini yakınsamaya çalışacak şekilde ifade edilmiştir. Aynı zamanda iki ölçüm noktası düğümü arasında kalan birden fazla girdi düğümü varsa, girdi düğümleri için belirlenecek akım değerleri bu düğümlerin çıkış noktası olduğu althavza alanları ile orantılı olacaktır. Ölçüm noktası düğümlerinde gözlemlenen debi değerlerinin yakınsanması için minimize edilecek amaç fonksiyonu olarak hataların ortalama karekökü (root mean square error, RMSE) fonksiyonu seçilmiştir. Amaç fonksiyonu, tüm gözlem noktalarında tahmin edilen akım değerleri ile ölçülen akım değerleri arasındaki bağıl hataların karelerinin toplamının gözlem noktası sayısına bölümünün minimizasyonunu ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu Denklem (4.6)'da verilmiştir;

$$\min z_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{Q}_j - Q_j\right)^2}{n}} \qquad ; \qquad i = 1,2,3,...38 \tag{4.6}$$

burada $\bar{Q}_j$ saha çalışması sonucu i numaralı ölçüm noktasında ölçülen debi, Q_j optimizasyon sonucu tahmin edilen debi değerini ifade etmektedir. Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan kısıtlar şunlardır:

1. Belirlenen su girdisi değerleri sıfırdan büyük olmalıdır,
2. Yüzde sapma fonksiyonu (PBIAS) değeri -0,0001 ve 0,0001 arasında olmalıdır.

Yüzde sapma fonksiyonu (PBIAS) Denklem (4.7) ile verilmiş olup;

$$PBIAS = \frac{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{Q}_j - Q_j\right)}{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{Q}_j\right)} \times 100 \qquad ; \quad i = 1,2,3,...38 \tag{4.7}$$

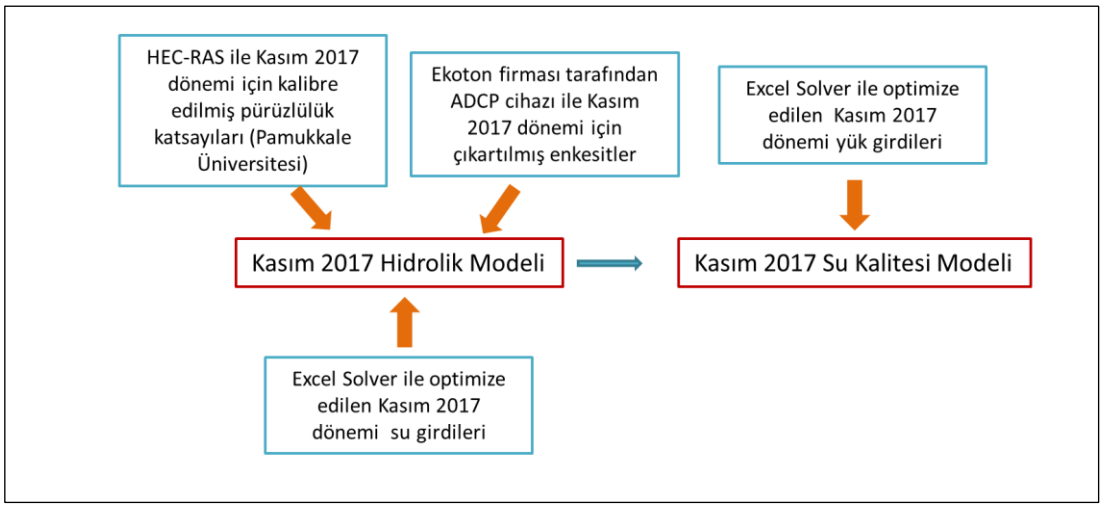
burada $\bar{Q}_j$ saha çalışması sonucu i numaralı ölçüm noktasında ölçülen debi, Q_j optimizasyon sonucu tahmin edilen debi değerini ifade etmektedir. Yüzde sapma fonksiyonu tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden büyük ya da küçük olma eğilimlerini göstermektedir. En iyi tahmin PBIAS değerinin 0 olduğu durum olarak ifade edilmektedir. PBIAS değerinin negatif olması tahminlerin gözlem değerlerinden düşük olma eğiliminde, pozitif olması ise yüksek olma eğiliminde

olduğunu göstermektedir. Opimizasyon probleminin çözümü için Microsoft Excel 2010 yazılımının Çözücü Eklentisi (Solver Add-in) kullanılmıştır. Excel Çözücüsü bir hücrede ifade edilen amaç fonksiyonu için en uygun değeri bulmayı sağlar. Çözücünün amaç fonksiyonu için en uygun değeri bulmak üzere kullandığı 3 yöntem vardır. Bu yöntemlerden "GRG Doğrusal Olmayan" genel indirgenmiş gradyan (GRG)" yönteminin, düzgün fakat doğrusal olmayan problemlerin çözümü için kullanılması önerilmektedir. Diğer iki yöntemden "Basit LP" yöntemi doğrusal optimizasyon problemlerinin Simplex yöntemi ile, "Açılım" yöntemi ise doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin evrimsel hesaplama yaklaşımı ile çözümünü kapsamaktadır. Nehre farklı noktalardan akım girdilerinin belirlenmesi optimizasyon probleminin en uygun çözümü için, doğrusal olmayan problemler için önerilmiş olan her iki yöntem de denenmiş olup "GRG Doğrusal Olmayan" yöntemi ile çözüme çok daha kısa sürede ulaşıldığı görülmüştür. Bu yüzden yöntem olarak "GRG Doğrusal Olmayan" yöntemi tercih edilmiştir.

Bu şekilde belirlenen akım girdileri sabit kabul edilerek iki ayrı ölçüm dönemi için dinamik dalga hidrolik modeli çözümleri gerçekleştirilmiştir. Model sonuçları tüm nehir kollarındaki akım değerlerinin kararlı duruma ulaşmasından sonra okunmuştur. Oluşturulan kararlı durum hidrolik modelleri ve sonuçları Kasım 2017 dönemi için Bölüm 4.3.1'de ve Şubat 2018 dönemi için Bölüm 4.3.2'de verilmiştir.

4.3.1. Kasım 2017 Hidrolik Modeli

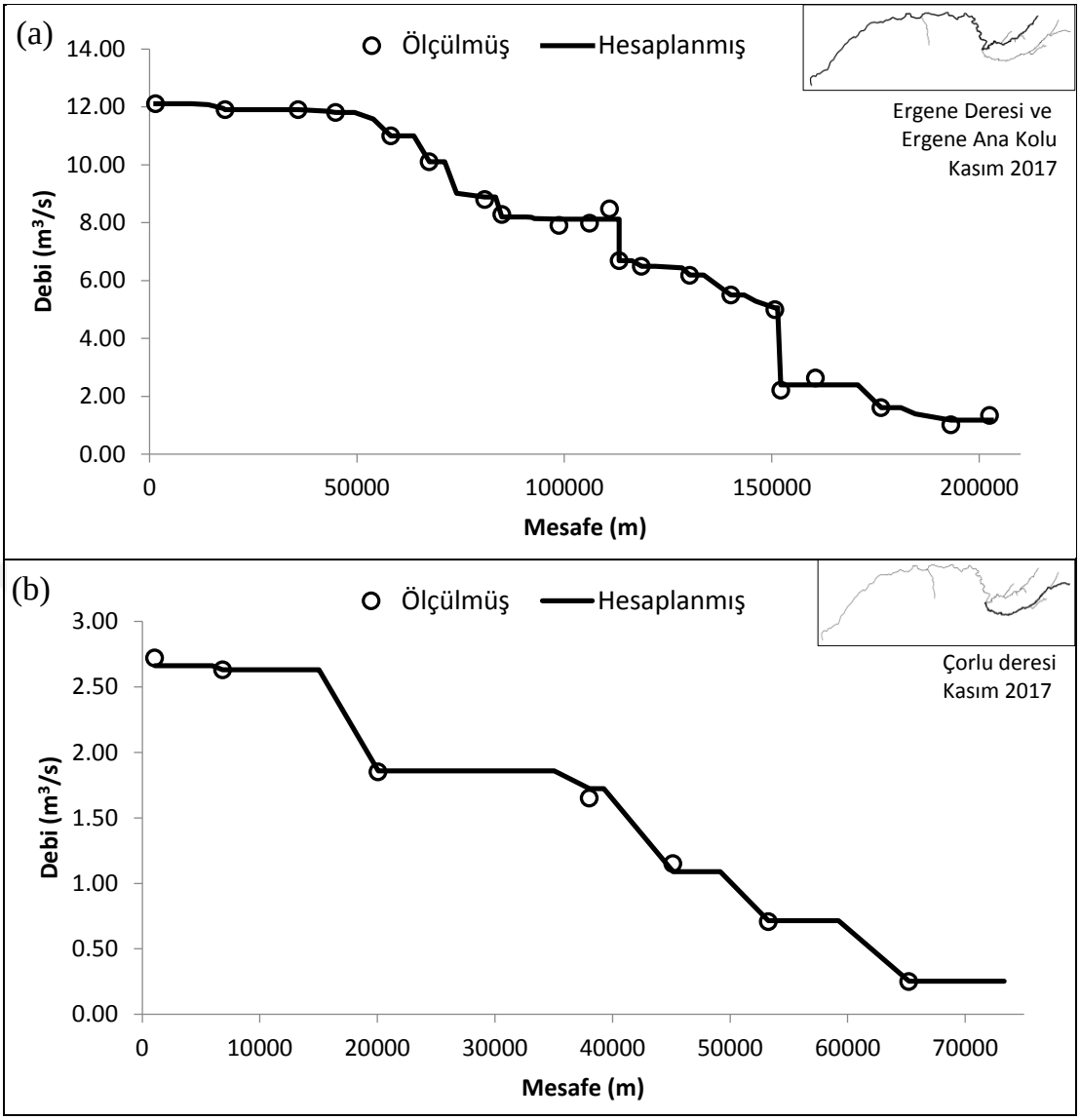
Kararlı durum modellerinin ölçüm anını yansıtması amaçlanmaktadır. Böylece ölçüm zamanında modellenen nehir kolları üzerinde ölçüm noktaları dışında kalan noktalardaki akım, derinlik, hız ve konsantrasyon parametreleri hesaplanabilecektir. Ayrıca Kasım 2017 dönemi için kurulacak olan kararlı durum taşınım modeli (Bölüm 5.2.1) bu model üzerine kurulacaktır (Şekil 4.34). Kasım 2017 saha çalışmalarında ölçülen debi değerleri ile güncel akım verisine (2010-2015) sahip İnanlı ve Lüleburgaz AGİ'lerinde Kasım ayında ölçülmüş debi değerleri karşılaştırılmıştır. AGİ debi değerlerinin %80'i ölçülmüş debi değerlerinden yüksektir. Kasım 2017'de ölçülmüş debilerin taban akım değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Bu durum Kasım 2017 Hidrolik Modeli'nin kararlı durumu yansıttığı varsayımını güçlendirmektedir.



Şekil 4.34. Kasım 2017 kararlı durum modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi

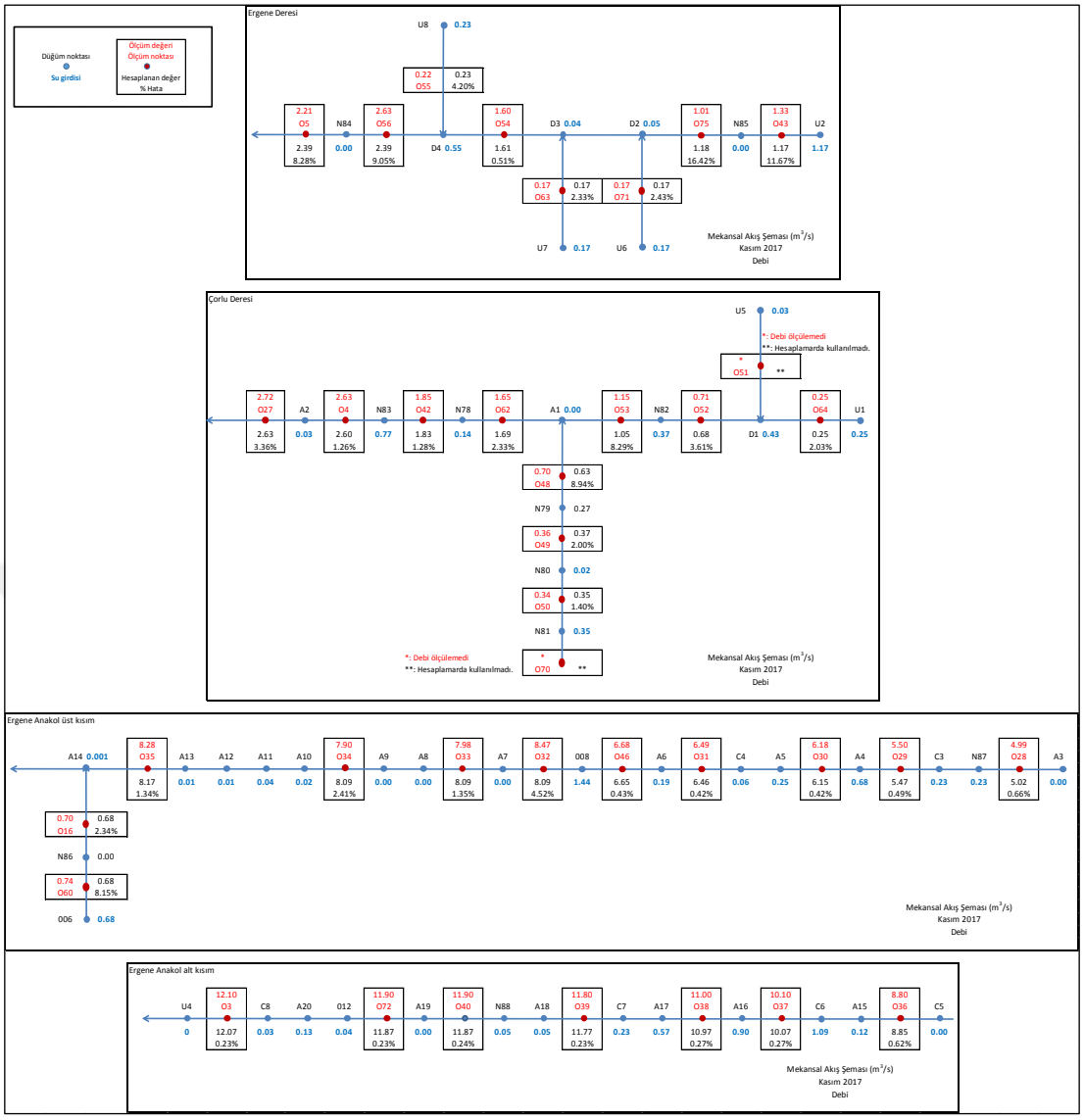
Bu amaçla Kasım 2017 Hidrolik Modeli'nde enkesit olarak Kasım 2017 saha çalışması ile elde edilen enkesitler doğrudan kullanılmıştır (Şekil 4.34). Kanalların pürüzlülük katsayıları olarak Bölüm 4.2.4.3'de anlatılan su hızı ve derinliğine göre kalibrasyon işlemi sonucu Kasım 2017 dönemi için belirlenen değerler kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 4.8'de F sütununda verilmiştir. Modellenen kanallar, düğümler ve kanal eğimleri modelleme çalışmalarında geliştirilen tüm modeller için aynıdır ve Bölüm 4.2.1 ve 4.2.2'de detaylı şekilde anlatılmıştır.

Hidrolik özellikleri bu şekilde belirlenen modele akım girdilerinin belirlenmesi ise Bölüm 4.3'ün giriş kısmında anlatıldığı üzere bir optimizasyon problemi olarak ele alınmış ve Microsoft Excel 2010 yazılımının Çözücü Eklentisi (Solver Add-in) ile modelin geliştirildiği Kasım 2017 döneminin saha ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. Kasım 2017 Hidrolik Modeli için Excel Solver ile belirlenen akım dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Kasım 2017 Hidrolik Modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 51 adet girdi düğümüne akım girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 0.10 ve PBIAS değeri 0.0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen akım dağılımı Şekil 4.35 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 4.35 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen akım dağımı sonucu oluşan Mekânsal Akış Şeması Şekil 4.36'da verilmiştir.

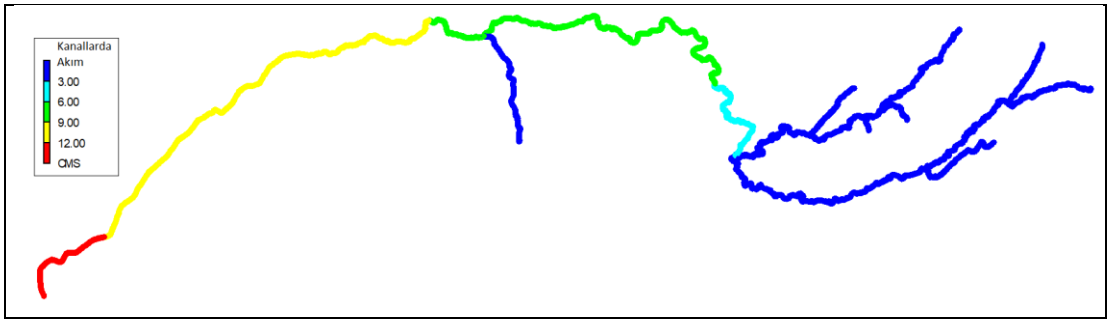


Şekil 4.36. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile belirlenen akımların Mekânsal Akış Şeması üzerinde gösterilmesi

Kasım 2017 Hidrolik Modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 51 adet girdi düğümüne akım girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 0,10 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen akım dağılımı Şekil 4.35 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 4.35 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen akım dağımı sonucu oluşan Mekânsal Akış Şeması Şekil 4.36'da verilmiştir.

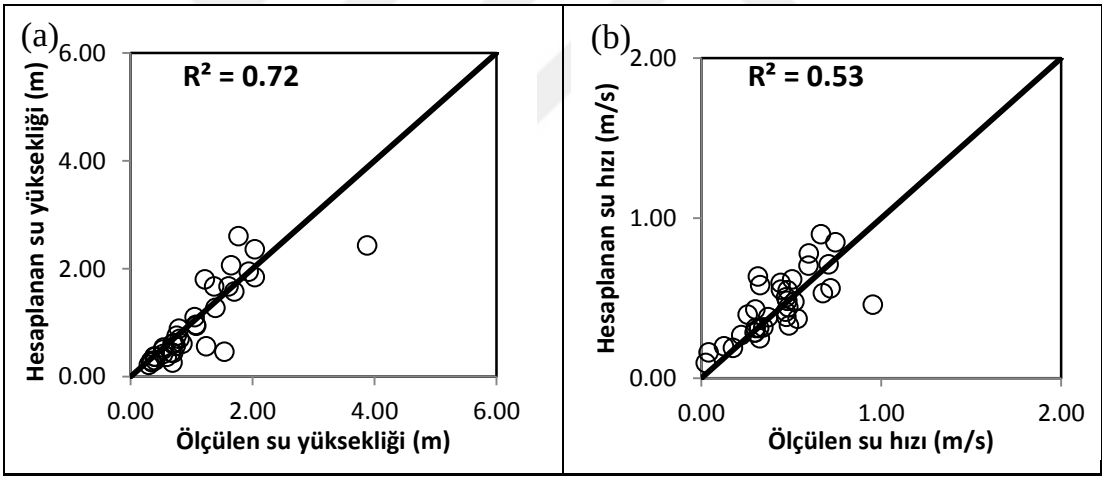
Belirlenen girdilerin kullanıldığı Kasım 2017 Hidrolik Modeli SWMM ile çözülmüş ve Ergene Nehri üzerindeki tüm kanallar ve düğümlerdeki akım, derinlik ve hız değerleri hesaplanabilmiştir. Şekil 4.37'de kararlı durum hidrolik model sonuçlarına

göre akarsu boyunca oluşan akım dağılımı gösterilmiştir. Akım değerlerinde beklenildiği gibi membadan mansaba doğru artış görülmektedir.



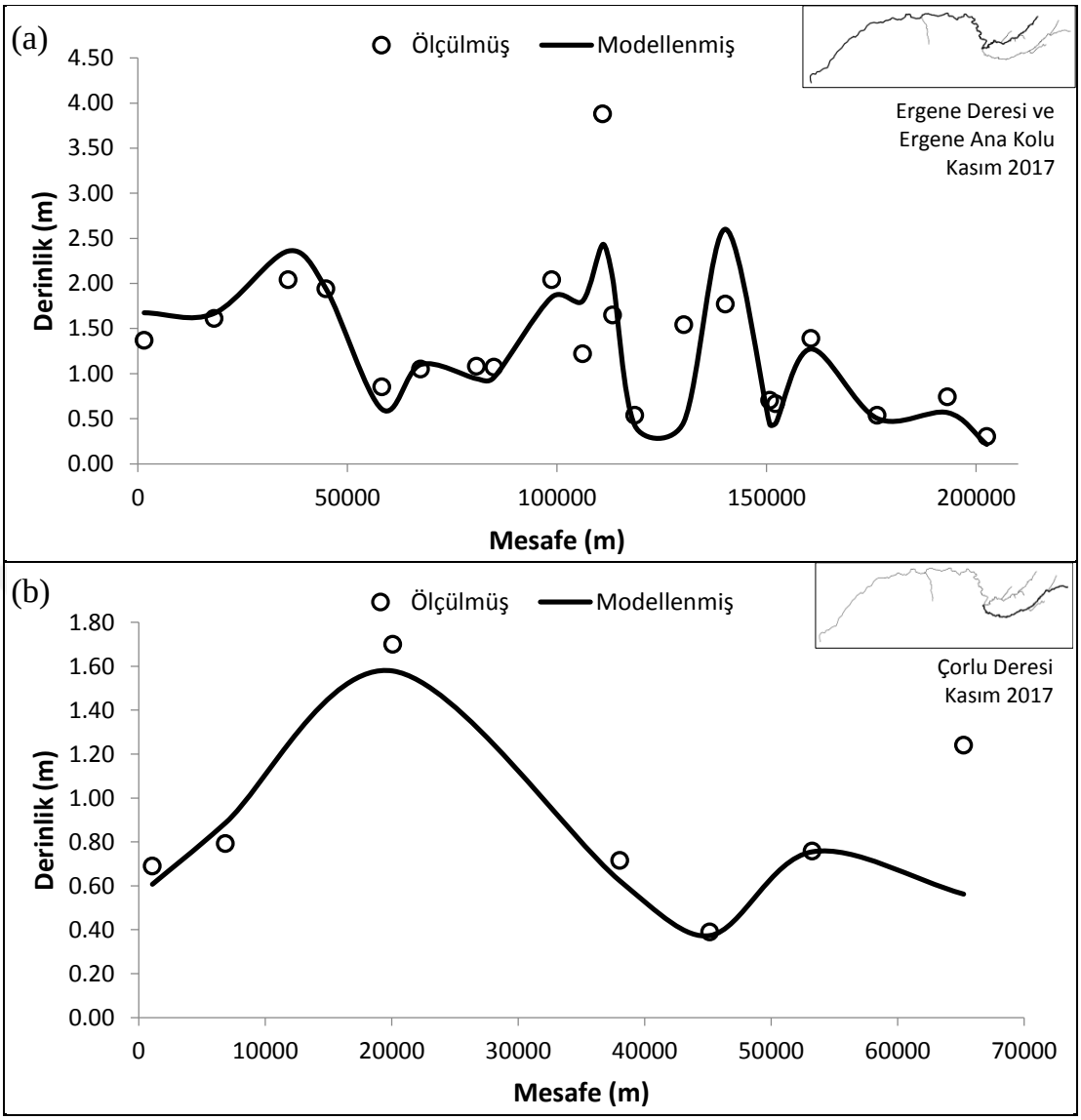
Şekil 4.37. Kasım 2017 hidrolik modeli sonuçlarına göre akarsu ağında akım dağılımı haritası

Her bir ölçüm noktası düğümünde ölçülen ve modellenen hız değerleri için R^2 değeri 0,72 (Şekil 4.38 (a)) ve su derinliği için R^2 değeri 0,53 (Şekil 4.38 (b)) olarak hesaplanmıştır.



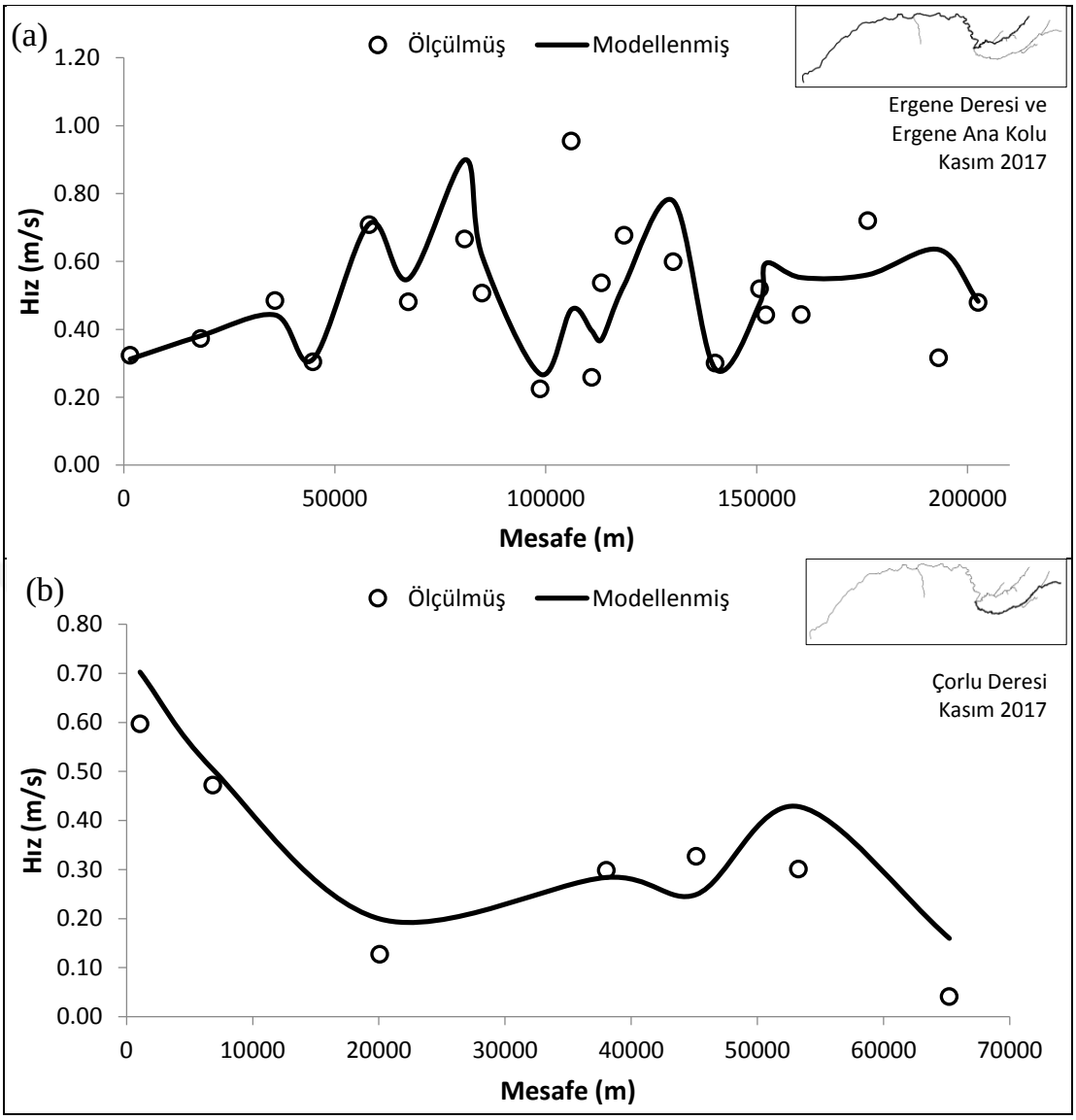
Şekil 4.38. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarının saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) su derinliği, b) ortalama su hızı

Kasım 2017 kararlı durum hidrolik model sonuçlarına göre su derinliği Şekil 4.39 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca, Şekil 4.39 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen değerlerle modellenen değerlerin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.39. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre su derinliğin nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Kararlı durum hidrolik model sonuçlarına göre su hızı Şekil 4.40 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca, Şekil 4.40 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen değerlerle modellenen değerlerin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

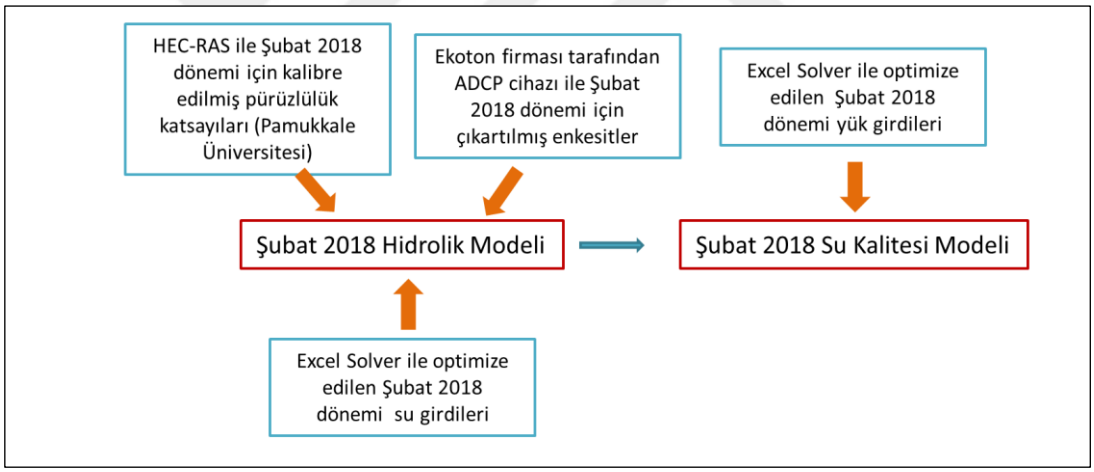


Şekil 4.40. Kasım 2017 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre su hızının nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Model sonuçlarına göre Kasım 2017 kararlı durum hidrolik modelinin saha çalışmaları ile belirlenen nehir hidrolik durumunu yeterli düzeyde yansıttığı görülmektedir. Ölçüm dönemini uygun şekilde yansıtan Kasım 2017 hidrolik modeli kararlı durum Kasım 2017 Taşınım Modeli (Bölüm 5.2.1) için altyapı sağlamıştır.

4.3.2. Şubat 2018 Hidrolik Modeli

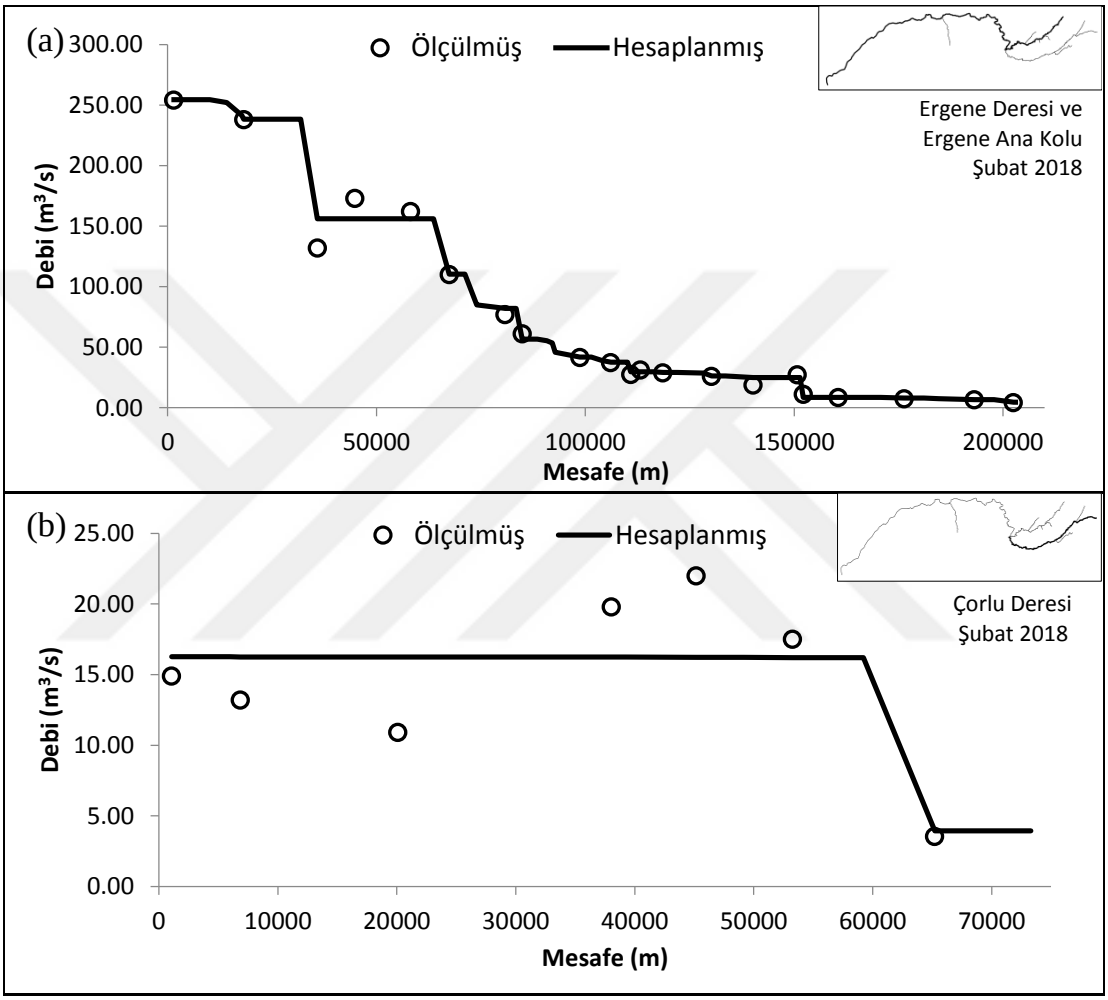
Şubat 2018 saha çalışmalarının sonuçlarını yansıtan ve modellenen nehir kolları üzerinde ölçüm noktaları dışında kalan noktalardaki akım, derinlik, hız ve konsantrasyon parametrelerini hesaplayabilen ayrı bir kararlı durum modeli geliştirilmiştir. Ayrıca Şubat 2018 dönemi için kurulacak olan kararlı durum taşınım modeli (Bölüm 5.2.2) bu model üzerine kurulacaktır (Şekil 4.41). Şubat 2018 saha çalışmalarında ölçülen debi değerleri ile güncel akım verisine (2010-2015) sahip İnanlı ve Lüleburgaz AGİ'lerinde Şubat ayında ölçülmüş debi değerleri karşılaştırılmıştır. İnanlı ve Lüleburgaz AGİ debi değerlerinin, sırasıyla, %21 ve %29'u ölçülmüş debi değerlerinden yüksektir. Şubat 2018'de ölçülmüş debilerin taban akım değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda Şubat 2018 hidrolik modelinin kararlı durumu yansıttığı varsayımında bulunmak gerçekçi olmayacaktır. Ancak sonuçlar ölçüm dönemi hidroliğini incelemede kullanılabilir.



Şekil 4.41. Şubat 2018 kararlı durum modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi

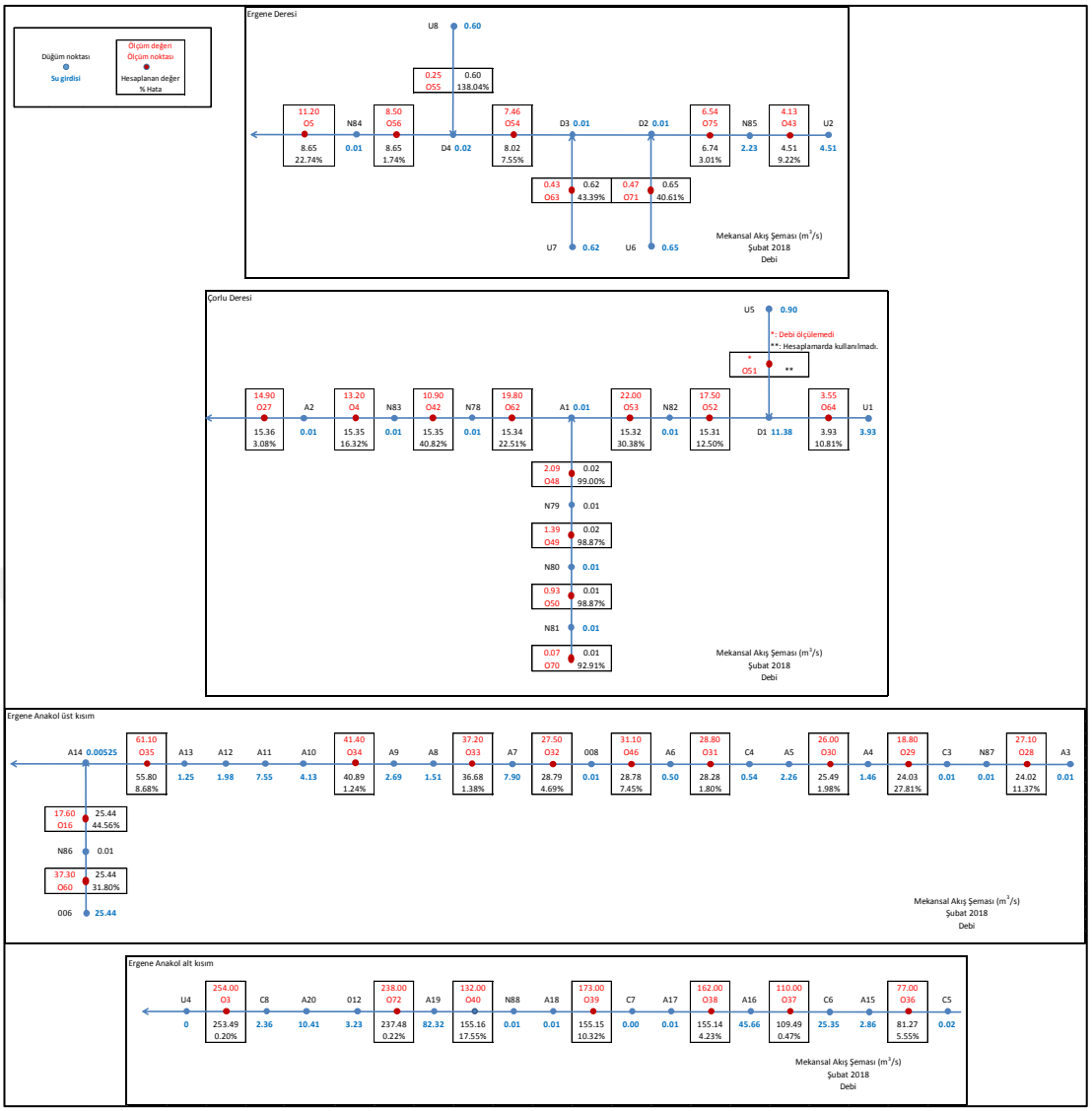
Şubat 2018 Hidrolik Modeli'nde Şubat 2018 dönemi saha çalışması ile elde edilen enkesit verileri doğrudan kullanılmıştır (Şekil 4.41). Kanalların pürüzlülük katsayısı değerleri için Bölüm 4.2.4.3'de anlatılan su hızı ve derinliğine göre kalibrasyon işlemi sonucu Şubat 2018 dönemi için belirlenen değerler kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 4.8 G sütununda verilmiştir. Modellenen kanallar, düğümler ve kanal eğimleri modelleme çalışmalarında geliştirilen tüm modelleri için aynıdır ve Bölüm 4.2.1 ve 4.2.2'de detaylı şekilde anlatılmıştır.

Hidrolik özellikleri bu şekilde belirlenen modele akım girdilerinin belirlenmesi ise Bölüm 4.3'ün giriş kısmında anlatıldığı üzere bir optimizasyon problemi olarak ele alınmış ve Microsoft Excel 2010 yazılımının Çözücü Eklentisi (Solver Add-in) ile modelin geliştirildiği Şubat 2018 döneminin saha ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.42).



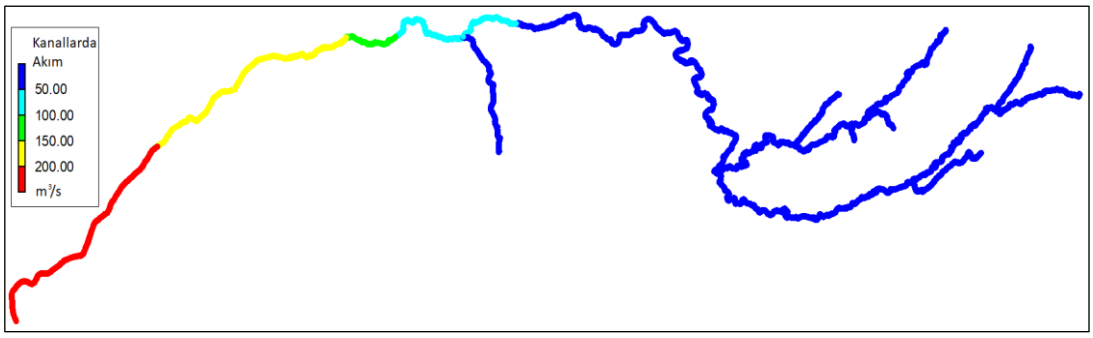
Şekil 4.42. Şubat 2018 modeli için Excel Solver ile belirlenen akım dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Şubat 2018 Hidrolik Modeli için Excel Çözücü ile nehir üzerindeki 51 adet girdi düğümüne akım girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 5,93 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen akım dağılımı Şekil 4.42 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 4.42 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen akım dağımı sonucu oluşan Mekânsal Akış Şeması Şekil 4.43'de verilmiştir.



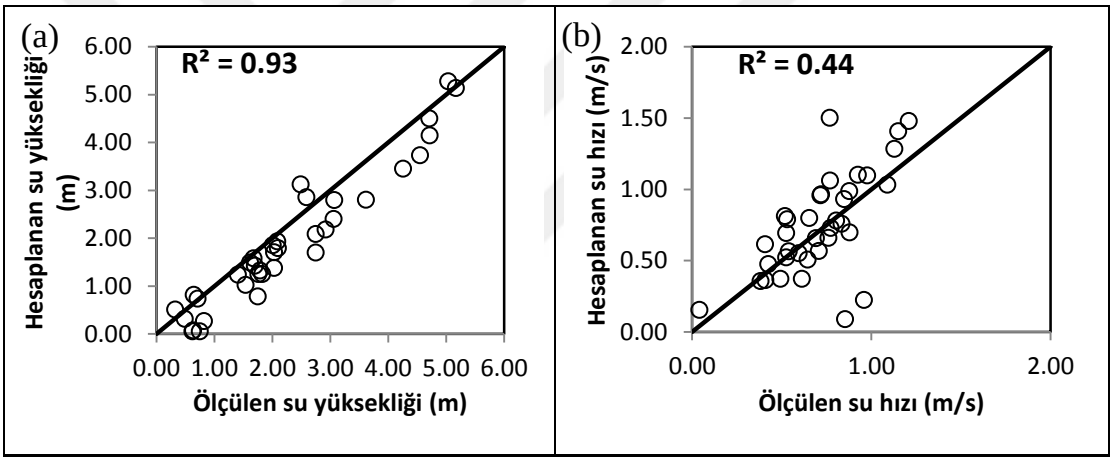
Şekil 4.43. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile belirlenen akımların Mekânsal Akış Şeması üzerinde gösterilmesi

Belirlenen girdilerin kullanıldığı Şubat 2018 Hidrolik Modeli SWMM ile çözülmüş ve Ergene Nehri üzerindeki tüm kanallar ve düğümlerdeki akım, derinlik ve hız değerleri hesaplanabilmiştir. Şekil 4.44'de kararlı durum model sonuçlarına göre akarsu boyunca oluşan akım dağılımı gösterilmiştir. Akım değerlerinde beklenildiği gibi membadan mansaba doğru artış görülmektedir.



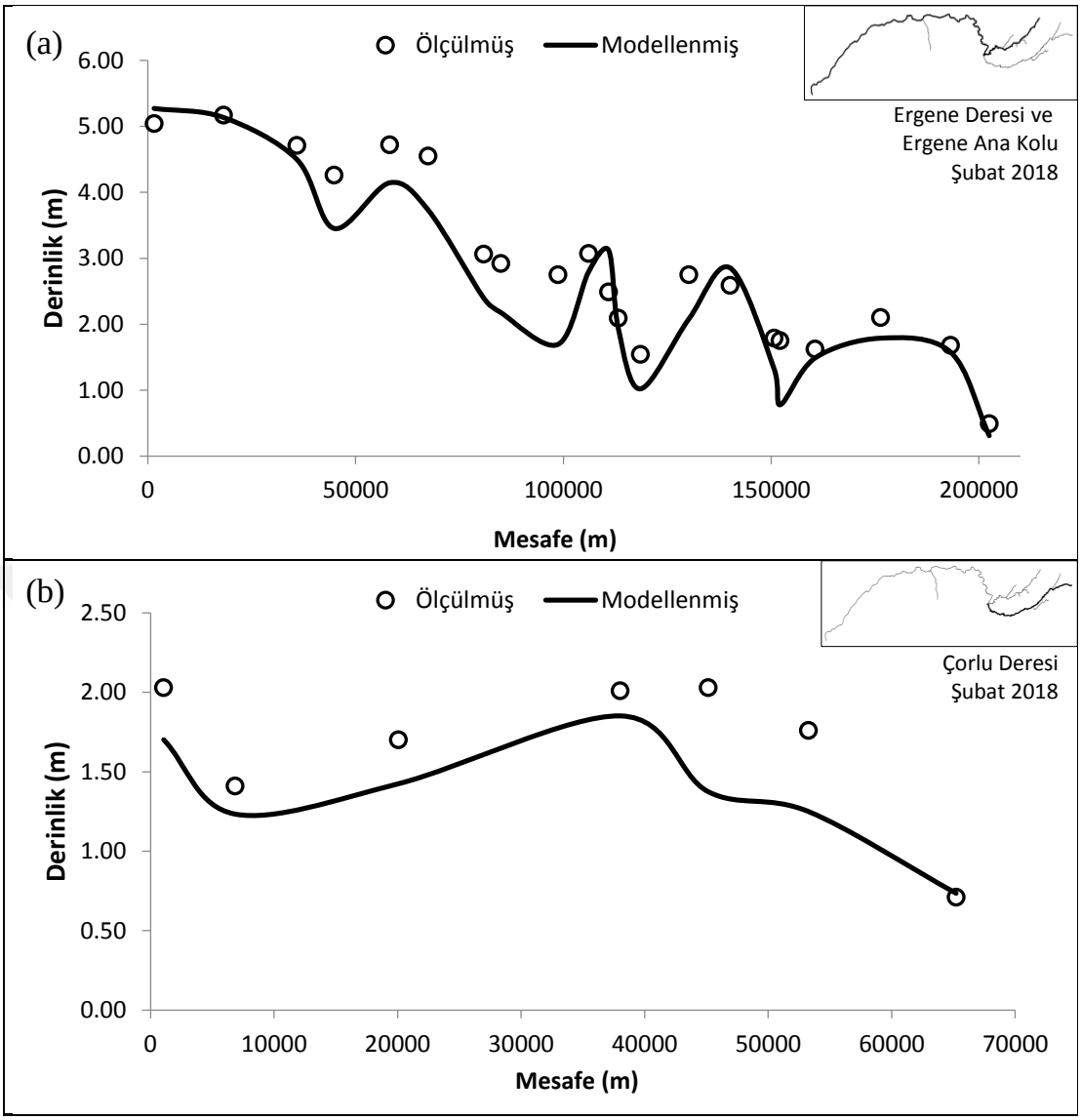
Şekil 4.44. Şubat 2018 Hidrolik Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında akım dağılımı haritası

Her bir ölçüm noktası düğümünde ölçülen ve modellenen hız değerleri için R^2 değeri 0.93 (Şekil 4.45 (a)) ve su derinliği için R^2 değeri 0.44 (Şekil 4.45 (b)) olarak hesaplanmıştır.



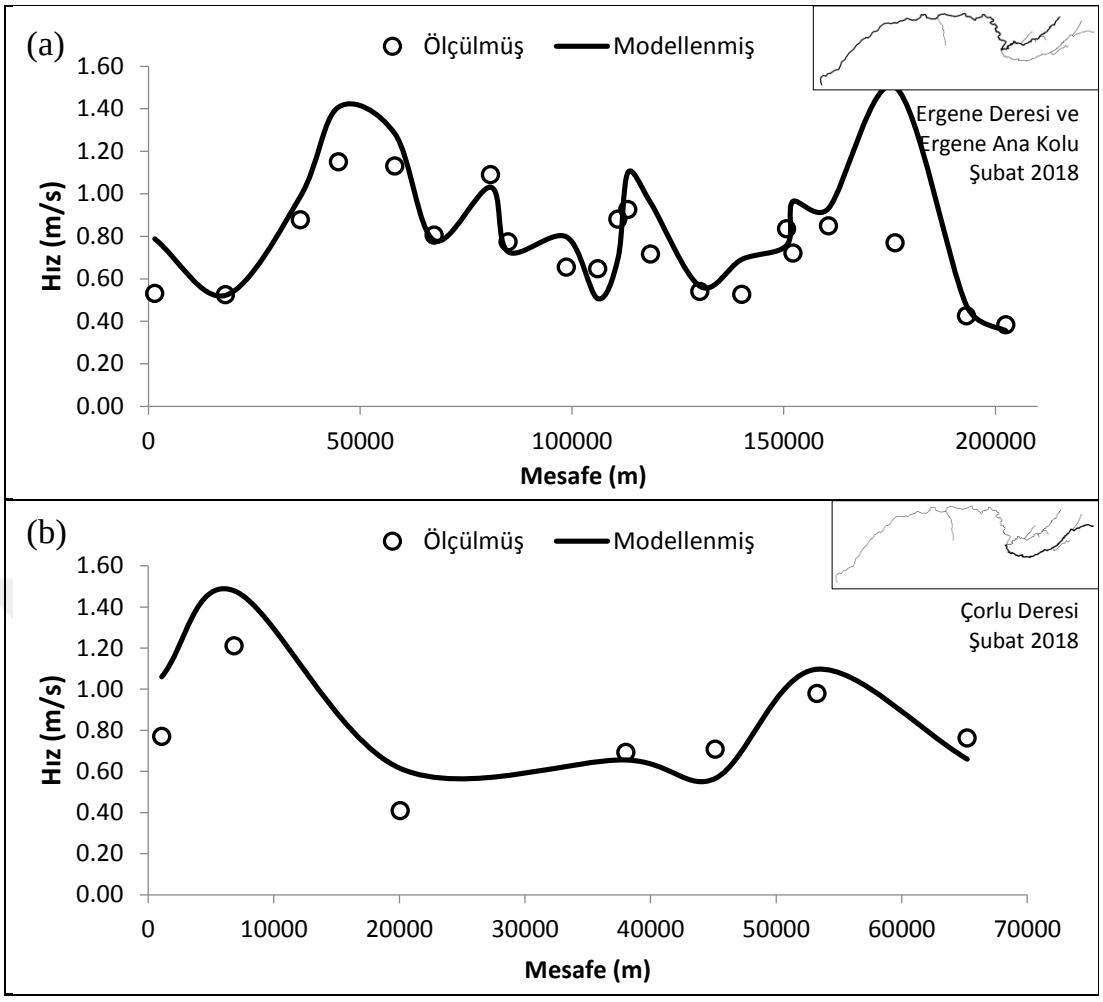
Şekil 4.45. Şubat 2018 Hidrolik Modeli sonuçlarının saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) su derinliği, b) ortalama su hızı

Kararlı durum hidrolik model sonuçlarına göre su derinliği Şekil 4.46 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca, Şekil 4.46 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen derinlik değerleri ile modellenen değerlerin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. Şubat 2018 hidrolik modeli sonuçlarına göre su derinliğin nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Kararlı durum hidrolik model sonuçlarına göre su hızı Şekil 4.47 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca, Şekil 4.47 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Şubat 2018 Hidrolik Modeli'nde hız parametresi için Kasım 2017 Hidrolik Modeli'ne kıyasla daha düşük bir uyum yakalanmıştır.



Şekil 4.47. Şubat 2018 hidrolik modeli sonuçlarına göre su hızının nehir ana kolları boyunca değişimi, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (0. metre Meriç ile birleşim noktasıdır.), b) Çorlu Deresi (0. metre Ergene Nehri'ne kavuşma noktasıdır.)

Model sonuçlarına göre Şubat 2018 kararlı durum hidrolik modelinin saha çalışmaları ile belirlenen nehir hidrolik durumunu yeterli düzeyde yansıttığı görülmektedir. Bu dönemde, su derinliklerinde Kasım 2017 Hidrolik Modeli'ne kıyasla ölçüm değerleri ile daha yüksek benzerlik yakalanmıştır. Su hızları ise, Kasım 2017 döneminde ölçüm değerleri ile daha yüksek benzerlik içindedir. Şubat 2018 Hidrolik Modeli kararlı durum Şubat 2018 Taşınım Modeli'ne (Bölüm 5.2.1) altyapı sağlamakta kullanılmıştır.

Ölçüm dönemi bazlı kararlı durum modelleri ile nehrin hidrolik özellikleri gerçek duruma en yakın şekilde modellenmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu modeller, bir sonraki aşamada Ergene Nehri'nin uzun dönemli hidroliğini temsil edecek dinamik bir modelin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Uzun dönemli hidrolik modellerde; kanal ve

düğüm dağılımının, kanal eğimlerinin, kanal enkesitlerinin ve kanal pürüzlülük katsayılarının Şubat 2018 Hidrolik Modeli'nde kullanılanlar olmasına karar verilmiştir. Ancak Ergene Nehri'ni temsil edecek nihai hidrolik model Bölüm 4.4'de anlatılan uzun dönem hidrolik modelleme çalışmaları sonucunda oluşturulmuştur.

4.4. Uzun Dönem Hidrolik Modeller

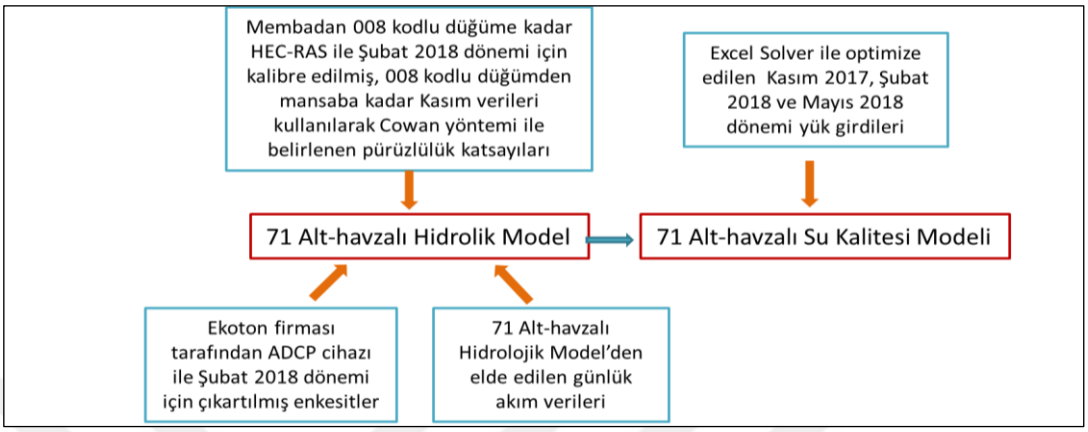
Bu bölümde uzun dönem hidrolik modelleme çalışmalarına yer verilmiştir. Geliştirilen hidrolik modeller 1997-2002 ve 2015 su yılları için 2 dönemi temsil etmektedir. 1997-2002 dönemi için kurulan model "71 Alt-havzalı Hidrolik Model" olarak isimlendirilmiştir. 2015 su yılını temsil eden dönem için kurulan hidrolik model ise "Nokta34 Hidrolik Modeli" olarak adlandırılmıştır.

71 Alt-havzalı Hidrolik Model ve Nokta34 Hidrolik Model'e akım girdisi olarak o dönemler için kalibre edilen uzun dönem hidrolojik modellerden elde edilen günlük ortalama debi değerleri kullanılmıştır. Akım girdilerinin elde edildiği hidrolojik modeller Bölüm 4.1.3'de anlatılmıştır. İlk geliştirilen model 71 Alt-havzalı Hidrolik Model'dir. Bu hidrolik modelin Ergene Nehri'ni temsil edebilecek yeterliliğe getirilmesi çalışmalarının ardından Nokta34 Hidrolik Modeli kurulmuştur. Ergene Nehrinin hidroliğini yeterli şekilde temsil eden bu modeller Bölüm 5.3'de anlatılan uzun dönem taşınım modellerine altyapı sağlamıştır.

4.4.1. 71 Alt-havzalı Hidrolik Model

"71 Alt-havzalı Hidrolik Model" olarak isimlendirilen ve uzun dönem modeli olan hidrolik model 1997-2002 su yıllarını kapsayan dönem için kurulmuştur. 71 Alt-havzalı hidrolik modelde kullanılan veriler Şekil 4.48'de gösterilmektedir. Modelde akım girdisi olarak Bölüm 4.1.3'de anlatılan 71 Alt-havzalı Hidrolojik Model'den elde edilen günlük ortalama akım verileri kullanılmıştır. Başlangıçta modelin hidrolik özellikleri (kanal enkesitleri ve kanal eğimleri) Şubat 2018 Hidrolik Modeli ile aynıdır. Bu şekilde kurulan model SWMM ile dinamik dalga yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Modelleme sonucu nehir ağı üzerindeki tüm düğüm ve kanallardaki akımlar belirlenmiştir. Modelin doğruluğunu göstermek amacıyla Nash-Sutcliffe Etkinlik katsayısı (NSE) ve korelasyon (r) ve değerleri kullanılmıştır. Bu değerler nehir ağı üzerinde bulunan 3 AGİ de gözlemlenen günlük ortalama debiler ve model

sonucu hesaplanan günlük ortalama debiler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu üç AGİ E01A012 no'lu Yenigörüce AGİ, D01A008 no'lu Lüleburgaz AGİ ve D01A020 no'lu İnanlı AGİ'dir.



Şekil 4.48. 71 Alt-havzalı modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi

Bu aşamada pürüzlülük katsayılarında kalibrasyona gidilerek model performansının artırılabileceği düşünülmüştür. Bu düşünceden hareketle 71 Alt-havzalı Hidrolik Model, Bölüm 4.2.4'de anlatıldığı şekilde farklı yöntemler ile belirlenen pürüzlülük katsayısı setleri kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu pürüzlülük katsayısı setleri yine Bölüm 4.2.4'de Tablo 4.8'de verilmiştir. Tablo 4.7'de verilen kodlara karşılık gelen pürüzlülük katsayısı setleri kullanılarak çalıştırılan modellere ait r ve NSE değerleri yine aynı kodlarla ifade edilecek şekilde Tablo 4.10'de verilmiştir.

Tablo 4.10. Farklı manning pürüzlülük katsayıları ile çalıştırılan 71 Alt-Havzalı Hidrolik Model'in sonuçlarının AGİ'lerde gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması

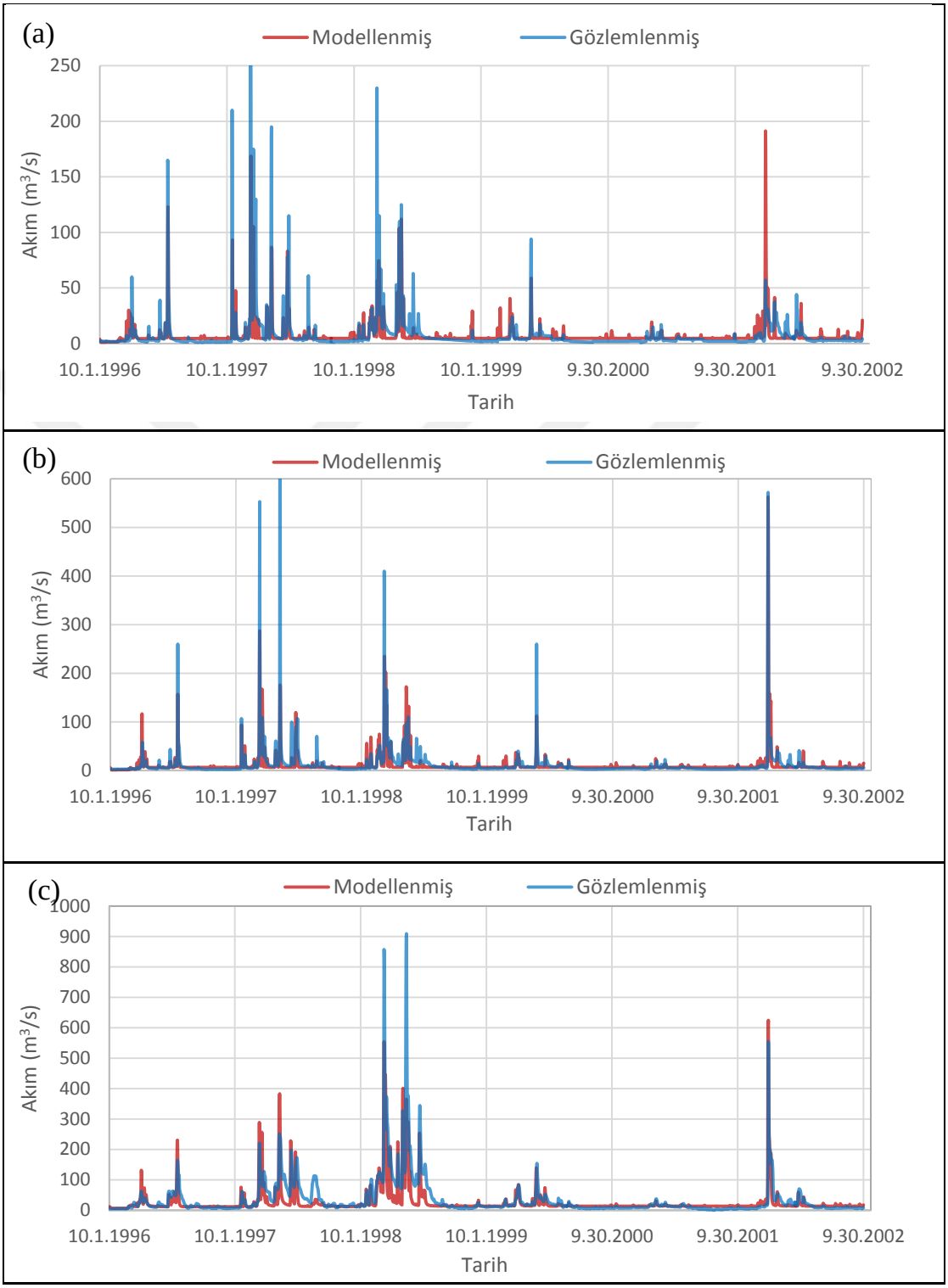
Kullanılan Manning n değerlerini belirlenme yöntemi (Tablo 4.7'de verilen kodlar)	Akım Gözlem İstasyonu					
	Yenicegörüce		Lüleburgaz		İnanlı	
	r	NSE	r	NSE	r	NSE
A	0,75	0,54	0,76	0,58	0,73	0,52
B	0,77	0,58	0,76	0,57	0,72	0,52
C	0,79	0,61	0,75	0,57	0,72	0,51
D	0,83	0,66	0,73	0,53	0,71	0,50
E	0,83	0,66	0,74	0,54	0,71	0,50
F	0,74	0,54	0,77	0,59	0,73	0,52
G	0,74	0,53	0,77	0,59	0,73	0,53
H	0,81	0,64	0,77	0,59	0,73	0,52

Elde edilen r ve NSE değerleri karşılaştırıldığında Lüleburgaz ve İnanlı AGİ'lerinde elde edilen en yüksek değerler G kodlu pürüzlülük katsayısı seti yani Şubat ayı saha ölçümleri kullanılarak su yüksekliğine ve hızına göre kalibre edilen pürüzlülük katsayıları seti kullanıldığında elde edilmiştir. Yenigörüce AGİ için ise en yüksek değerler Cowan yöntemi ile belirlenen pürüzlülük katsayısı setlerinin kullanıldığı modellerle elde edilmiştir. E kodu ile ifade edilen, Kasım 2017 dönemi verileri kullanılarak Cowan yöntemi ile belirlenen pürüzlülük katsayısı setinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar D kodlu setin kullanılması ile elde edilen sonuçlardan nispeten iyidir. Cowan yönteminin öznel bir yöntem olmasına ve iki farklı dönem için belirlenen pürüzlülük katsayısı değerlerinin birebir aynı olmamasına karşın sonuçların bu denli yakın olması yöntemin kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Chow (1956) tarafından önerilen pürüzlülük katsayısı tablosundan tüm kanallar için kullanılacak tek bir değer seçilmesinin çok doğru bir yaklaşım olmayacağı görülmektedir. Tablodan seçilen 0,030, 0,035 ve 0,040 değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 4.10'da sırasıyla A, B ve C kodlu satırlarda verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde nehrin nispeten memba kısmında kalan İnanlı ve Lüleburgaz AGİ'lerinde pürüzlülük katsayısı düştükçe daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Mansap kısmındaki Yenigörüce AGİ'de ise pürüzlülük katsayısı yükseldikçe r ve NSE değerleri iyileşmektedir. Bu sonuçlar pürüzlülük katsayılarında kalibrasyona gidilmesinin doğru bir yaklaşım olduğunu desteklemiştir.

Yukarıdaki paragrafta özetlendiği şekilde Tablo 4.10'daki sonuçlar karılaştırıldığında H kodu (Tablo 4.7) ile ifade edilen "Lüleburgaz AGİ'ye kadar G yöntemi ile belirlenmiş değerlerin, Lüleburgaz AGİ'den sonra E yöntemi ile belirlenen değerlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu şekilde belirlenen pürüzlülük katsayısı değerleri modellenen Ergene Nehri kanalları için nihai pürüzlülük katsayısı değerleri olup Tablo 4.8'de H sütununda verilmiştir.

H sütunundaki pürüzlülük katsayıları ile çalıştırılan 71 Alt-Havzalı Hidrolik Model'e ait r ve NSE değerleri sırasıyla Yenigörüce AGİ için 0,81 ve 0,64, Lüleburgaz AGİ için 0,77 ve 0,59, İnanlı AGİ için 0,73 ve 0,52 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.11). Bu değerler modelleme çalışmaları boyunca 71 Alt-havzalı Hidrolik Model için elde edilen en iyi değerler olup bu modelin kirletici taşınım modeline altyapı sağlayacak güvenilirlikte olmasını sağlamıştır. Modelleme periyodu için elde edilen akım

verilerinin İnanlı, Lüleburgaz ve Yenigörüce AGİ'lerinde gözlemlenen akım verileri ile karşılaştırıldığı grafikler sırasıyla Şekil 4.49 (a), (b) ve (c)'de sunulmuştur.

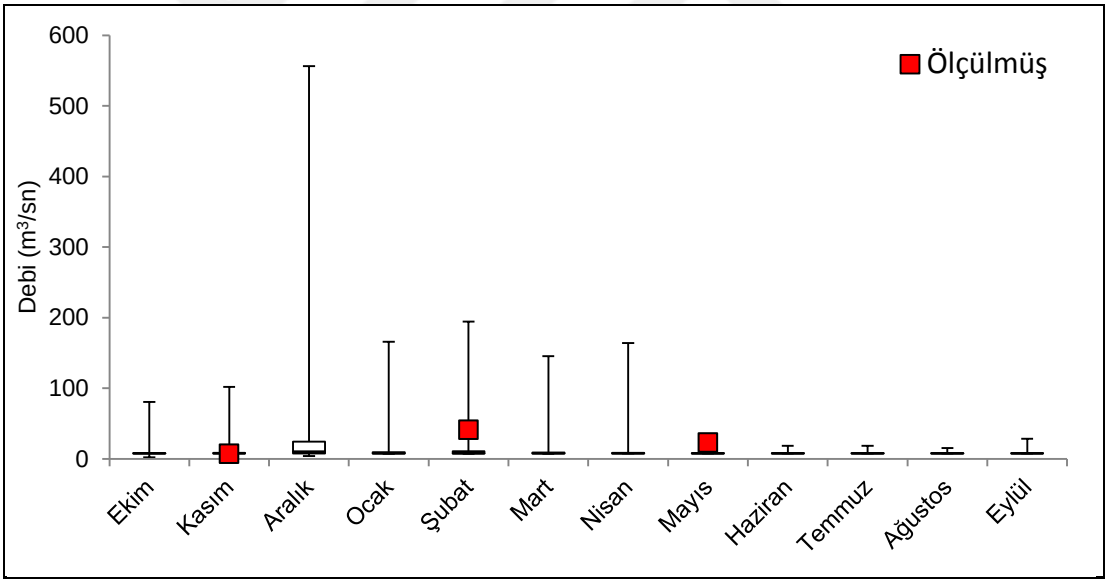


Şekil 4.49. Ergene Nehri üzerindeki 3 adet AGİ'deki akım ölçümleri ile 71 Alt-Havzalı Hidrolik Model sonuçlarının karşılaştırılması a) İnanlı AGİ b) Lüleburgaz AGİ c) Yenigörüce AGİ

Tablo 4.11. 71 Alt-havzalı Hidrolik Modele ait sonuçların AGİ'lerde gözlemlenen akım değerleri ile karşılaştırılması

71 Alt-havzalı Hidrolik Model (1997-2002)					
Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)					
Yenigörüce		Lüleburgaz		İnanlı	
r	NSE	r	NSE	r	NSE
0,81	0,64	0,77	0,59	0,73	0,52

Ayrıca modelleme periyodu içinde kalan farklı su yılları için hesaplanan farklı aylara ait debiler, 34 numaralı gözlem noktasında farklı saha çalışmaları sırasında ölçülen debiler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.50). Bu gözlem noktasında, Şubat 2018 ve Mayıs 2018 saha çalışmaları sırasında ölçülen debi değerleri, 1997-2002 yılları arası için hesaplanan debi değerlerinden genel olarak daha yüksektir. Kasım 2017 döneminde ölçülen debi değeri ise modellenen debi değerlerine genel olarak yakındır.

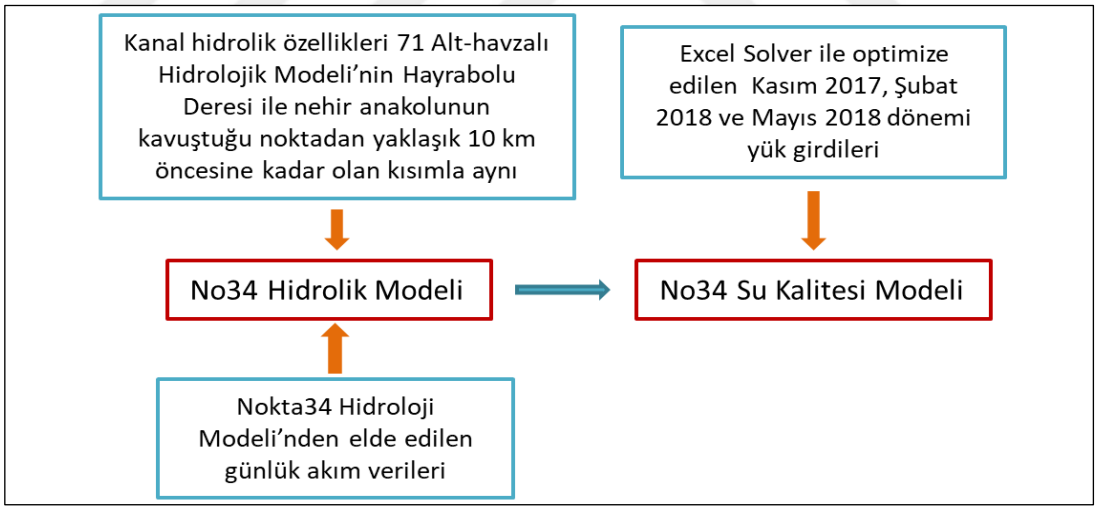


Şekil 4.50. Gözlem noktası 34'te Kasım, Şubat ve Mayıs dönemi saha çalışmalarında ölçülmüş debiler ile 71 Alt-havzalı Hidrolik Model'in farklı su yılları için hesapladığı farklı aylara ait debilerin karşılaştırılması

71 Alt-havzalı Hidrolik Model'den yalnızca kanal sayısı azaltılarak ve modelleme periyodu değiştirilerek Nokta34 Hidrolik Modeli olarak adlandırılan hidrolik model üretilmiştir. Bu model Bölüm 4.4.2'de anlatılmaktadır.

4.4.2. Nokta34 Hidrolik Modeli

"Nokta34 Hidrolik Modeli" olarak isimlendirilen ve uzun dönem modellerden biri olan bu hidrolik model 2015 su yılı için kurulmuştur. Bu model 71 Alt-havzalı Hidrolik Model'in, O34 nolu düğümde sonlandırılması ile elde edilmiştir (Şekil 4.51). Elde edilen modelin hidrolik özellikleri 71 Alt-havzalı Hidrolik Model ile tamemen aynıdır. Modelde akım girdisi olarak Bölüm 4.1.3' de anlatılan Nokta34 Hidrolojik Modeli'nden günlük ortalama akım verisi şeklinde elde edilen 40 adet alt-havza hidrografı kullanılmıştır. Ayrıca bu modele havza içerisinde yer alan bazı OSB'lere ve kentsel AAT'lere ait deşarj debileri noktasal kaynak olarak dâhil edilmiştir. Modelde kullanılan 18 adet deşarj kaynağının havza ve çevresine ait harita üzerinde gösterimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu deşarjların etkisi hidrolojik model alt-havza hidrograflarında görülmediğinden Nokta34 Hidrolik Modeli'ne noktasal kaynak olarak eklenmeleri gerekmiştir. Bu kaynaklara ait deşarjlar kaynağa en yakın yerde bulunan düğüme girdi olmuşlardır. Sözü edilen deşarj değerleri ve Nokta34 Hidrolik Modeli'ne hangi düğümlerden verildikleri Tablo 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 4.51. Nokta34 modellerinin geliştirilmesinde kullanılan verilerin gösterilmesi

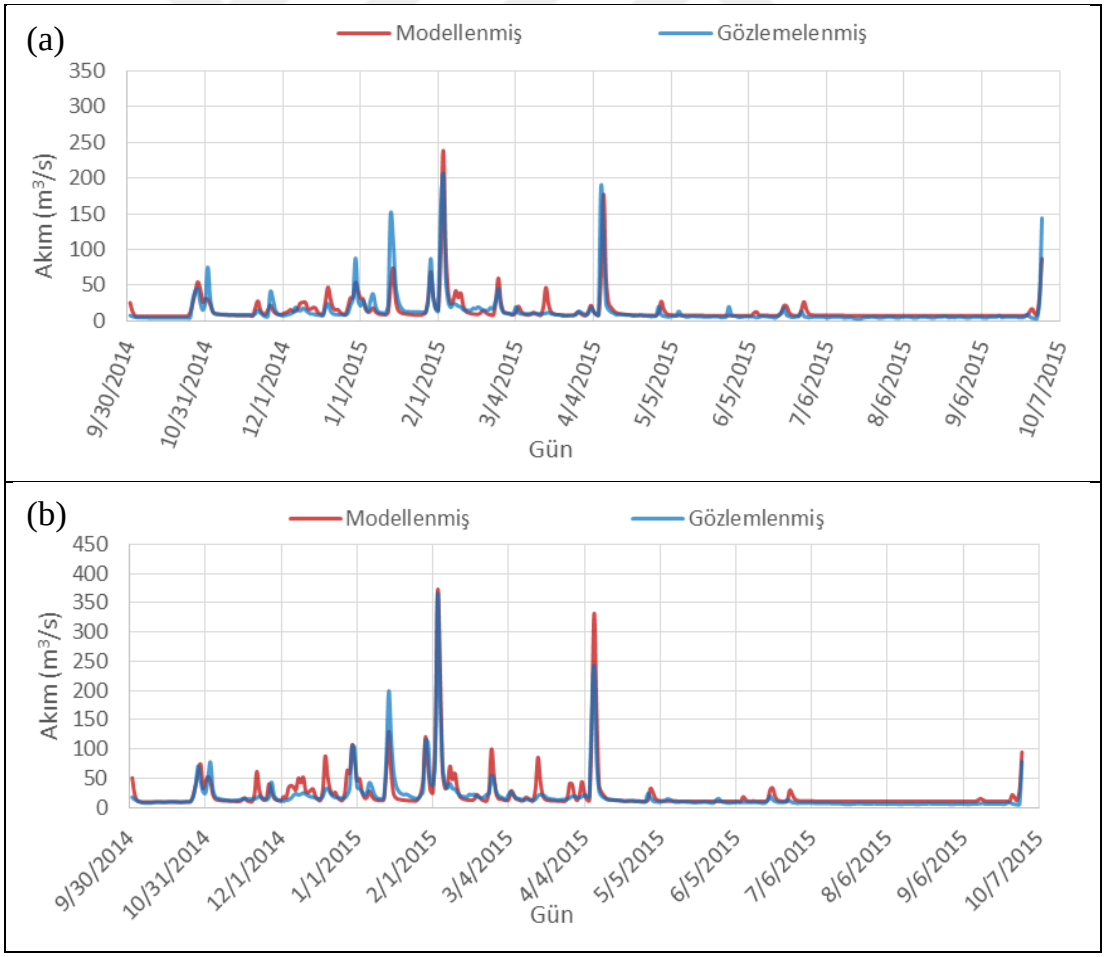
Bu şekilde kurulan model SWMM ile dinamik dalga yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Modelleme sonucu nehir ağı üzerindeki tüm düğüm ve kanallardaki akımlar belirlenmiştir. Modelin doğruluğunu göstermek amacıyla Nash-Sutcliffe Etkinlik katsayısı (NSE) ve korelasyon (r) değerleri kullanılmıştır. Bu değerler nehir ağı üzerinde bulunan 2 AGİ'de gözlemlenen günlük ortalama debiler ve model sonucu hesaplanan günlük ortalama debiler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu iki AGİ

D01A008 no'lu Lüleburgaz AGİ ve D01A020 no'lu İnanlı AGİ'dir. Korelasyon ve NSE değerleri sırasıyla Lüleburgaz AGİ için 0,92 ve 0,80, İnanlı AGİ için 0,83 ve 0,68 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.12). Bu değerler modelin 71 Alt-havzalı Hidrolik Model'e göre daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Tablo 4.12. Nokta34 Hidrolik Modeli'ne ait sonuçların AGİ'lerde gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması

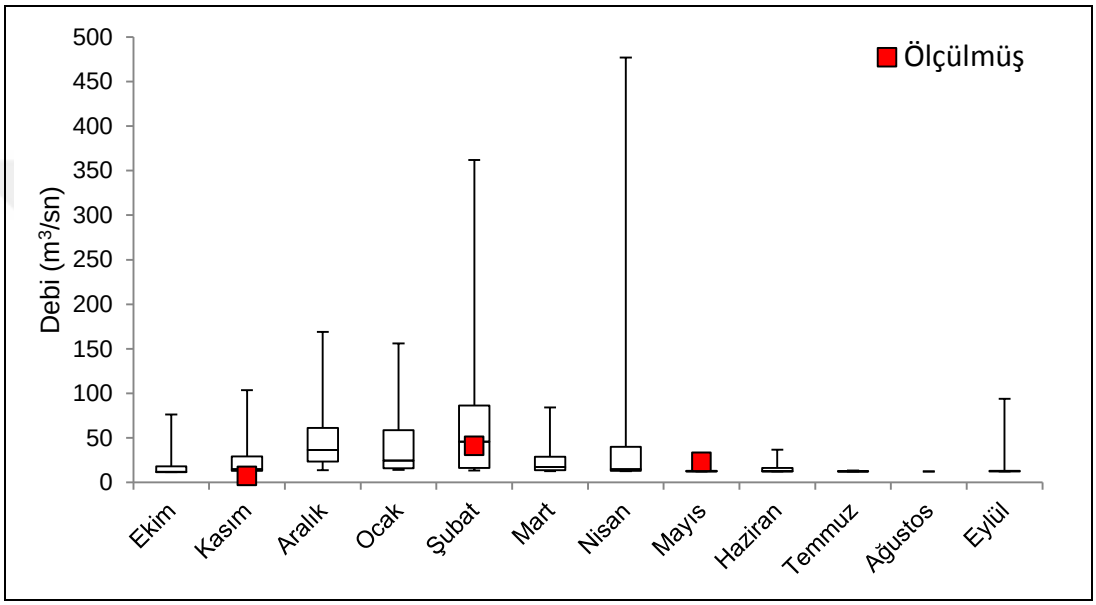
Nokta34 Hidrolik Modeli (2015)			
Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)			
Lüleburgaz		İnanlı	
r	NSE	r	NSE
0,92	0,80	0,83	0,68

Modelleme periyodu için elde edilen akım verilerinin İnanlı ve Lüleburgaz AGİ'lerinde gözlemlenen akım verileri ile karşılaştırıldığı grafikler sırasıyla Şekil 4.52 (a) ve (b)'de sunulmuştur.



Şekil 4.52. Ergene Nehri üzerindeki 2 adet AGİ'deki akım ölçümleri ile Nokta34 Hidrolik Modeli sonuçlarının karşılaştırılması a) İnanlı AGİ b) Lüleburgaz AGİ

Ayrıca modelleme periyodunu oluşturan 2015 su yılı için hesaplanan farklı aylara ait debiler, 34 numaralı gözlem noktasında farklı saha çalışmaları sırasında ölçülen debiler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.53). Bu gözlem noktasında, Mayıs 2018 saha çalışmaları sırasında ölçülen debi değeri, 2015 su yılı için hesaplanan debi değerlerinden daha yüksektir. Kasım 2017 döneminde ölçülen debi değeri ise o ay için hesaplanan değerlerin altında kalmaktadır. Şubat 2018 döneminde ölçülen debi değeri ise o ay için hesaplanan değerlere genel olarak yakındır.



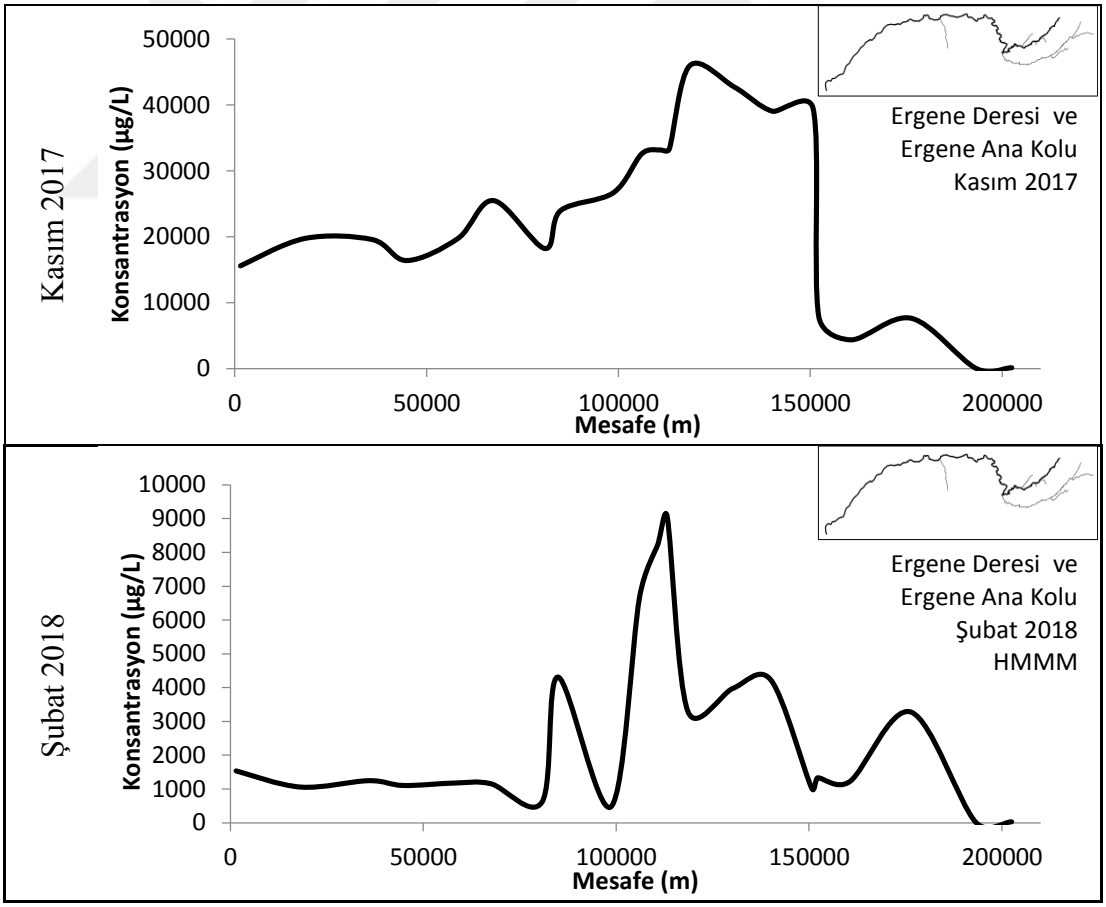
Şekil 4.53. Gözlem noktası 34'te Kasım, Şubat ve Mayıs dönemi saha çalışmalarında ölçülmüş debiler ile Nokta34 Hidrolik Modeli'nin 2015 su yılı için hesapladığı farklı aylara ait debilerin karşılaştırılması

5. ERGENE NEHRİ İÇİN KİRLETİCİ TAŞINIMI MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde Ergene Nehri için kirletici taşınım modeli geliştirilmesi çalışmalarına yer verilmiştir. Taşınım modelleri Bölüm 4.3'de anlatılan, ölçüm dönemlerini temsil eden (kararlı durum modelleri) Kasım 2017 Hidrolik Modeli ve Şubat 2018 Hidrolik Modeli ve Bölüm 4.4'de anlatılan uzun dönemli modeller olan 71 Alt-havzalı Hidrolik Model ve Nokta34 Hidrolik Modeli altyapısı üzerine kurulmuşlardır. Taşınım modellerinin uygulanabilirliğini göstermek için 115Y064 numaralı proje kapsamında projenin bir diğer paydaşı olan Boğaziçi Üniveristesi tarafından yapılan analizler sonucu Ergene Nehri'ne özgü kirletici kaynakları için parmak izi kirleticisi olarak belirlenen hekza(metoksimetil)melamin (HMMM) organik kirleticisi izleyici (tracer) kimyasal olarak seçilmiştir. Geliştirilen taşınım modelleri yardımı ile HMMM kirleticisinin nehir boyunca taşınımı incelenebilmiştir. HMMM kirleticisi tekstil ve otomotiv/metal sektöründe tekstil boyaması ve metal kaplama işlemlerinde oldukça sık kullanılan bir bağlayıcıdır (Dsikowitzky ve Schwarzbauer, 2015). HMMM Ergene Nehri üzerindeki hemen her ölçüm noktasında gözlemlenmiştir. HMMM konsantrasyonu tüm nehir boyunca 100 µg/L'den 300 mg/L konsantrasyon aralığında tespit edilmiştir. Bu kirletici havza için önem teşkil etmektedir. Ayrıca 115Y064 no'lu proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda HMMM kirleticisinin toksik olduğu, biyolojik bozunuma uğramadığı ve Ergene Nehrinde giderilemeyen KOİ'ye önemli oranda katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

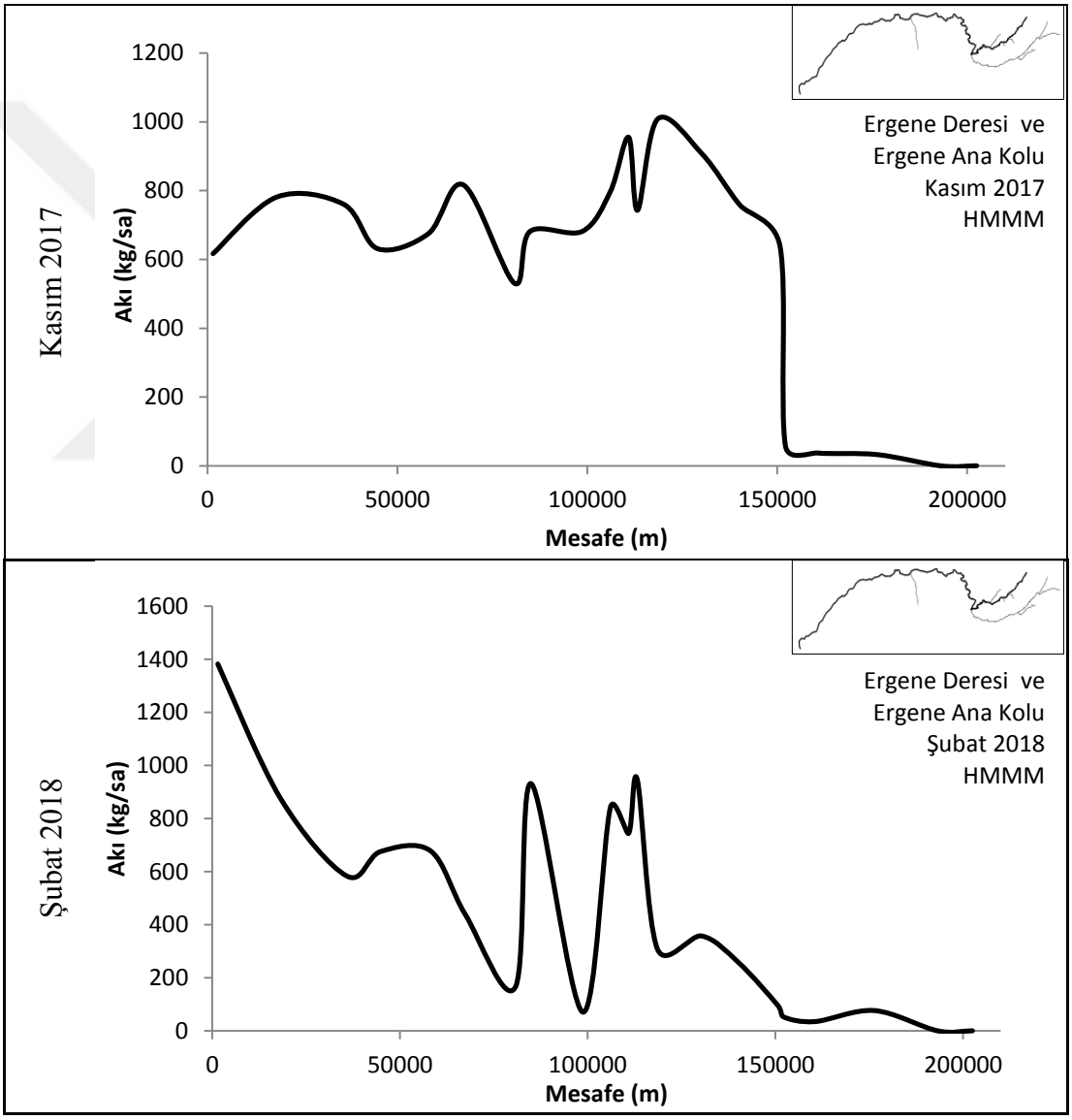
Modellenmesine karar verilen HMMM kimyasalının farklı dönemlerde Ergene Nehri içindeki çözünmüş konsantrasyonlarının taşınım modelleri ile hesaplanabilmesi için bu kimyasalların farklı noktalardan nehre giriş miktarlarının (yük) bilinmesi gereklidir. Kimyasalların yük dağılımlarının belirlenmesi için saha çalışmaları sonucu elde edilen verilerden faydalanılmıştır. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde sadece o dönemler için belirlenen kirletici yük değerleri kullanılmıştır. 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nde ve Nokta34 Taşınım Modeli'nde ise Kasım,

Şubat ve Mayıs ölçümlerinden elde edilen kirletici yük değerleri kullanılmıştır. Tablo 4.2'den görüleceği gibi Kasım, Şubat ve Mayıs dönemlerinde debi ve su kalitesi örneklemeleri yapıldığından bu dönemler için yük değerleri hesaplanabilmiş (Ağustos ayında debi ölçümü yapılmadığından bu dönem için yük hesaplanamamıştır.) böylelikle uzun dönem hidrolik modellere girdi sağlanabilmiştir. Şekil 5.1'de HMMM kimyasalının Kasım 2017 ve Şubat 2018 saha çalışmaları sonucu ölçülen konsantrasyonlarının Ergene Nehri ana kolu boyunca değişimi görülmektedir. Kasım 2017'de konsantrasyonlar tüm nehir boyunca Şubat 2018'e göre daha yüksektir. Yağışın yüksek olduğu dönem olan Şubat 2018'de konsantrasyonlar seyrelmiştir. İki döneme bakıldığında ölçülen konsantrasyonların sürekli ve monoton bir şekilde artmadığı dalgalandığı görülmektedir. Ayrıca mansap kısımlarında konsantrasyonların azaldığı açıkça görülmektedir. Mansap kısmındaki bu azalma yüksek debiden kaynaklamaktadır.



Şekil 5.1. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca hexa(methoxymethyl)melamine (HMMM) kirletici konsantrasyonunun değişimi (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Konsantrasyon değeri nehir-içi kirlilik yükünün yanında nehir debisi ile de ilişkilidir. Sisteme verilen yüksek miktarda kirletici yüksek debiye sahip bir bölümden geçerken seyrelecek ve kirletici kaynağının etkisini önemsizleştirecektir. Ancak aynı miktarda kirletici debinin az olduğu bir zamanda örneğin yaz aylarında aynı noktadan sisteme verildiğinde yüksek konsantrasyonlara ulaşacaktır. Bu yüzden nehirdeki kirlilik durumunu belirlemek için anlık ölçülen akım (m^3/s) ve konsantrasyon (µg/L) değerlerinin çarpımından elde edilen akı (kg/sa) değerleri kullanılacaktır.

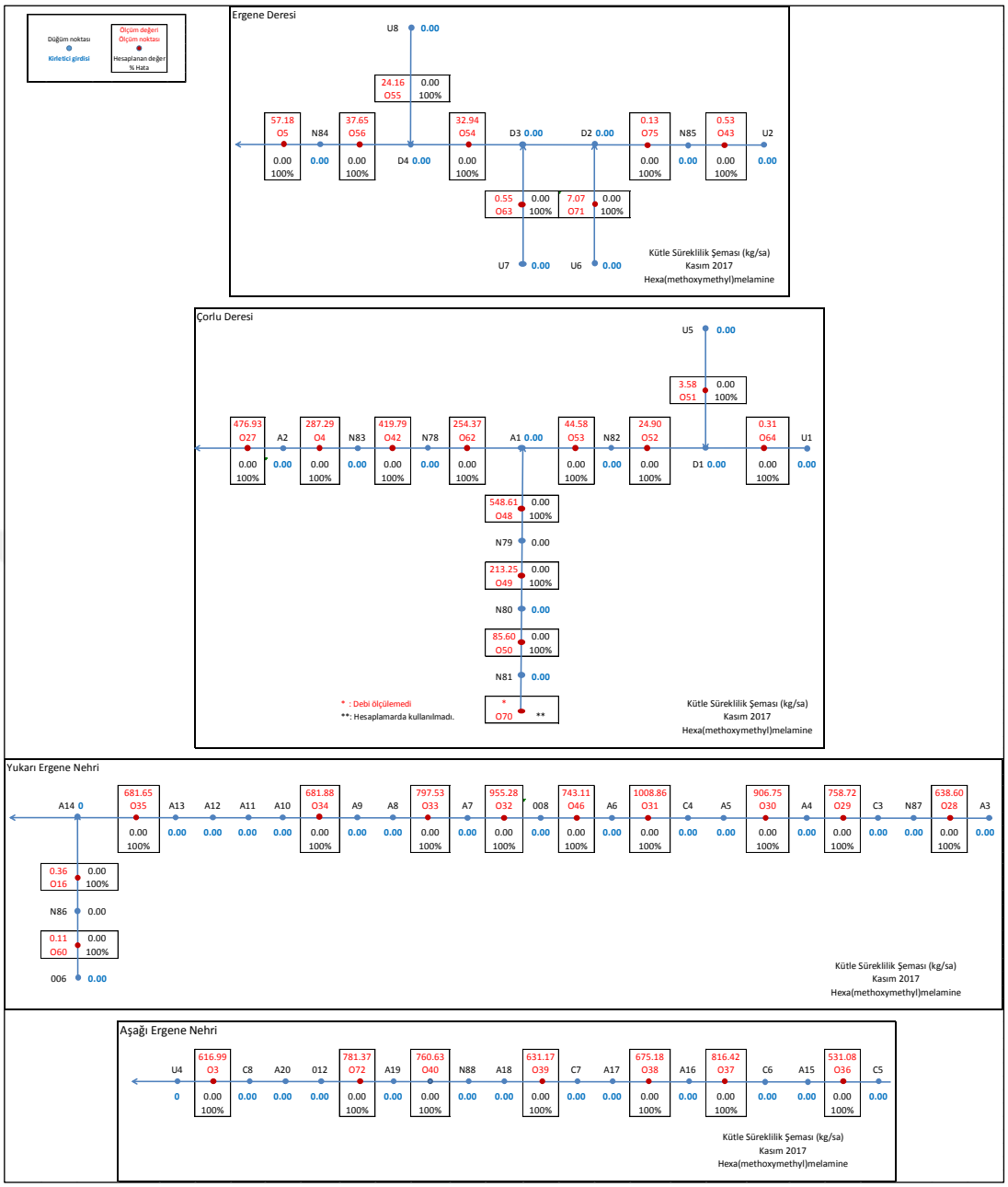


Şekil 5.2. Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde Ergene Deresi ve Ergene Nehri Ana Kolu boyunca hexa(methoxymethyl)melamine kirletici akısının değişimi (Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu üzerinde 151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Şekil 5.2'de HMMM kimyasalı için Kasım 2017 ve Şubat 2018 dönemlerinde hesaplanan akı değerlerinin Ergene Nehri ana kolu boyunca değişimi görülmektedir. Akı değerleri saha çalışmaları sonucu belirlenen ve anlık örneklemeye dayanan konsantrasyon ve akım değerlerinin çarpımı ile hesaplandığından ölçüm hataları ve kısa süreli varyasyonların etkilerini yansıtmaktadırlar. Akı değerlerinin devamlı bir artış göstermediği görülmektedir. Lâkin kirletici girdilerinin bu şekilde bir artış göstermesini beklemek gerçekçi değildir. Çünkü girdiler nehir boyunca konumlanmış herhangi bir endüstriyel tesisten kaynaklanıyor olabilir. Bir tesisten salınan kirletici miktarı nehir boyunca farklı bozunum mekanizmalarının etkisi ile azalarak ilerlerken başka bir tesisin katkısı ile miktarı artabilir. Ancak HMMM kirleticisinin biyolojik bozunuma uğramadığı proje çalışmaları sonucunda belirlenmiş olduğundan bu durum geçerli değildir. Dolayısıyla akı değerlerindeki dalgalanmaların bir kısmının hatalar ve kısa süreli varyasyonların sonucu olduğu varsayılmıştır. Oluşturulacak su kalitesi modelinin bu varyasyonlardan arındırılması gerekmektedir. Bu nedenle nehre farklı noktalardan kimyasal girdilerinin saha ölçüm verileri kullanılarak belirlenmesinde hidrolik modelleme çalışmalarında uygulanan optimizasyon yöntemi farklı kısıtlar ile kirletici yüklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Modellerde optimize edilen HMMM yük girdilerinin sabit ve sürekli deşarj edildiği varsayımı yapılmıştır.

5.1. Yük Girdilerinin Belirlenmesi

Geliştirilecek kirletici taşınım modellerinin ölçümdeki hatalardan ve kısa süreli varyasyonlardan arındırılması için nehre farklı noktalardan kirletici girdilerinin belirlenmesi bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Akımların belirlenmesinde olduğu gibi yük opimizasyon probleminin çözümü için de Microsoft Excel 2010 yazılımının Çözücü Eklentisi (Solver Add-in) kullanılmıştır. Optimizasyon probleminin çözümü için Çözücü Eklentisi içerisinde "GRG Doğrusal Olmayan" yöntemi kullanılmıştır. Yük optimizasyon probleminin ifadesi için Kütle Süreklilik Şeması olarak adlandırdığımız takip şemaları oluşturulmuştur. Bu Kütle Süreklilik Şeması'nın bir örneği Kasım 2017 dönemi için Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Kasım 2017 dönemi için oluşturulan Kütle Süreklilik Şeması

Şekil 5.3'de verilen Kütle Süreklilik Şeması'nda modellenen akarsu ağı üzerindeki düğüm noktalarının birbirlerine göre konumları belirtilmiştir. "O" harfi ile ifade edilen düğümler ölçüm noktalarını ifade eden düğümlerdir. Bu noktalarda hesaplanan yük değerleri ve optimizasyon sonucu bu noktalarda oluşacak yük değerleri arasındaki yüzde bağıl hatalar belirtilmiştir. Ölçüm noktası düğümleri SWMM arayüzünde debi, hız, derinlik ve konsantrasyon parametrelerinin okunacağı düğümlerdir; dolayısıyla bu düğümlerden yük girdisi olmayacaktır. Nehre yük girdilerinin olacağı düğümler ölçüm noktaları düğümleri arasında kalan düğümler

(girdi düğümleri) olacaktır. Girdi düğümü olabilecek düğümler 51 adettir. Bu kapsamda optimizasyon problemi Excel üzerinde, girdi düğümlerinden giren yük değerleri akış aşağı toplanarak ölçüm noktası düğümlerinde hesaplanan yük değerlerini yakınsamaya çalışacak şekilde ifade edilmiştir. Ölçüm noktası düğümlerinde hesaplanan yük değerlerinin yakınsanması için minimize edilecek amaç fonksiyonu olarak akım optimizasyonunda olduğu gibi hataların ortalama kare kökü (root mean square error, RMSE) fonksiyonu seçilmiştir. Amaç fonksiyonu, tüm gözlem noktalarında tahmin edilen yük değerleri ile hesaplanan yük değerleri arasındaki bağıl hataların karelerinin toplamının gözlem noktası sayısına bölümünün minimizasyonunu ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu Denklem (5.1)'de verilmiştir;

$$\min z_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{L}_j - L_j\right)^2}{n}} \quad ; \quad i = 1,2,3,...38 \tag{5.1}$$

burada $\bar{L}_j$ i numaralı ölçüm noktasında saha çalışmaları sonucu ölçülen akım ve konsantrasyon değerlerinin çarpımı ile hesaplanan kg/sa cinsinden yük değeri, L_j optimizasyon sonucu tahmin edilen yük değerini ifade etmektedir. Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan kısıtlar şunlardır:

1. Belirlenen yük girdisi değerleri negatif olmayacaktır,
2. Yüzde sapma fonksiyonunun (PBIAS) -0,0001 ve 0,0001 değerleri arasında olacaktır,
3. Tahmin edilen değerler gözlemlenen en büyük yük değerinden büyük olmayacaktır.

Yüzde sapma fonksiyonu (PBIAS) Denklem (5.2) ile verilmiş olup;

$$PBIAS = \frac{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{L}_j - L_j\right)}{\sum_{j=i}^{n}\left(\bar{L}_j\right)} \times 100 \quad ; \quad i = 1,2,3,...38 \tag{5.2}$$

burada $\bar{L}_j$ saha çalışması sonucu i numaralı ölçüm noktasında saha çalışmaları sonucu ölçülen akım ve konsantrasyon değerlerinin çarpımı ile hesaplanan kg/sa cinsinden yük değerini, L_j optimizasyon sonucu tahmin edilen yük değerini ifade etmektedir. Yüzde sapma fonksiyonu tahmin edilen değerlerin gözlemlenen

değerlerden büyük ya da küçük olma eğilimlerini göstermektedir. En iyi tahmin PBIAS değerinin 0 olduğu durum olarak ifade edilmektedir. PBIAS değerinin negatif olması, tahminlerin gözlem değerlerinden düşük olma eğilimini, pozitif olması ise yüksek olma eğilimini göstermektedir.

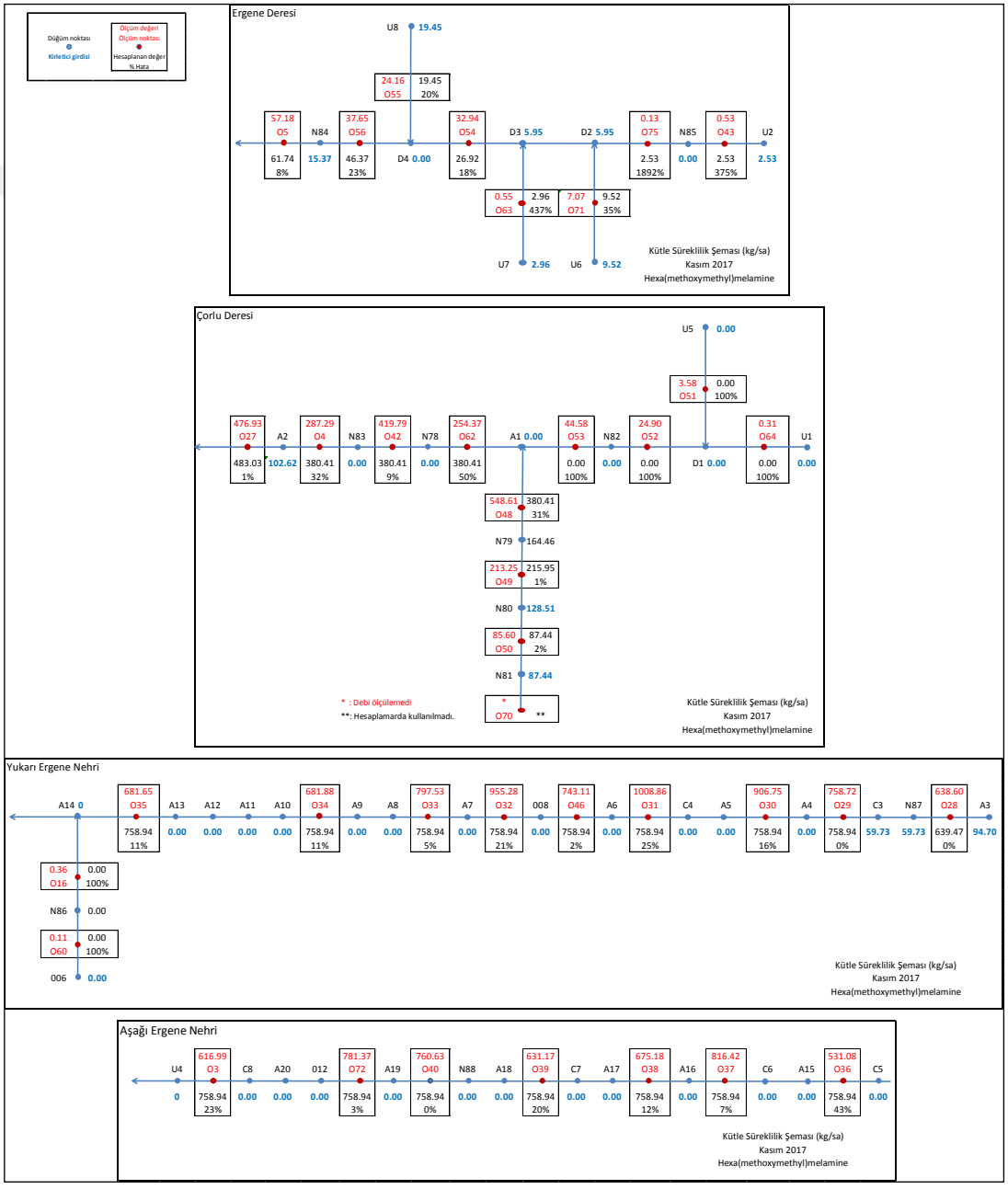
Yük değerleri için optimizasyon problemini tanımlarken dikkat edilmesi gereken bir nokta nehre herhangi bir noktadan kirletici girişi olabileceği ihtimalidir. Bu ihtimal dahilinde tüm girdi düğümlerinden yük girdisi olabileceği gibi (bu durumda yük girişine izin verilecek girdi düğümü 51 adet olacaktır) nehir boyunca spesifik bir kirletici için yalnızca bir kaynak olabilir. Nehir boyunca bir kaynak olması durumunda yük girişine izin verilecek girdi düğümü sayısı 1 olacaktır. Bu durum göz önüne alınarak yük girdilerini belirleme işleminde iki yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan biri girdi düğümlerini sınırlandırmadan, 51 adet girdi düğümünden yük girişine izin vererek yük dağılımını belirlemek. Bu yaklaşım "sınırlandırılmamış" olarak isimlendirilmiştir. Diğeri modellenecek kirleticinin kaynakları ya da kaynağı biliniyorsa yalnızca o kaynaklara yakın olan girdi düğümünden yük girişine izin vererek girdi düğümü sayısını sınırlandırarak yük girdilerini belirlemektir. Bu yaklaşım "sınırlandırılmamış" olarak isimlendirilmiştir. HMMM kirleticisinin nehir boyunca yük dağılımını belirlemek için iki yaklaşım da denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.2. Kararlı Durum Taşınım Modelleri

Kararlı durum modelleri ile ölçüm anının benzeşimini yapmak amaçlanmaktadır. Kararlı durum taşınım modelleri ile ölçüm döneminde ölçüm noktaları dışında kalan noktalardaki konsantrasyonların hesaplanması mümkün olmuştur. Amaç ölçüm anının benzeşimini yapmak olduğundan bu modellerde kurulduğu dönemin ölçüm değerleri kullanılmıştır. Kasım 2017 Taşınım Modeli ve Şubat 2018 Taşınım Modeli olmak üzere 2 model üretilmiştir. Bu modeller Bölüm 4.3'de yer alan kararlı durum hidrolik modelleri üzerine kurulmuştur. Her bir model için de iki farklı yük belirleme yöntemi (sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış) sonucu elde edilen yükler kullanılarak modellenen konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır.

5.2.1. Kasım 2017 Taşınım Modeli

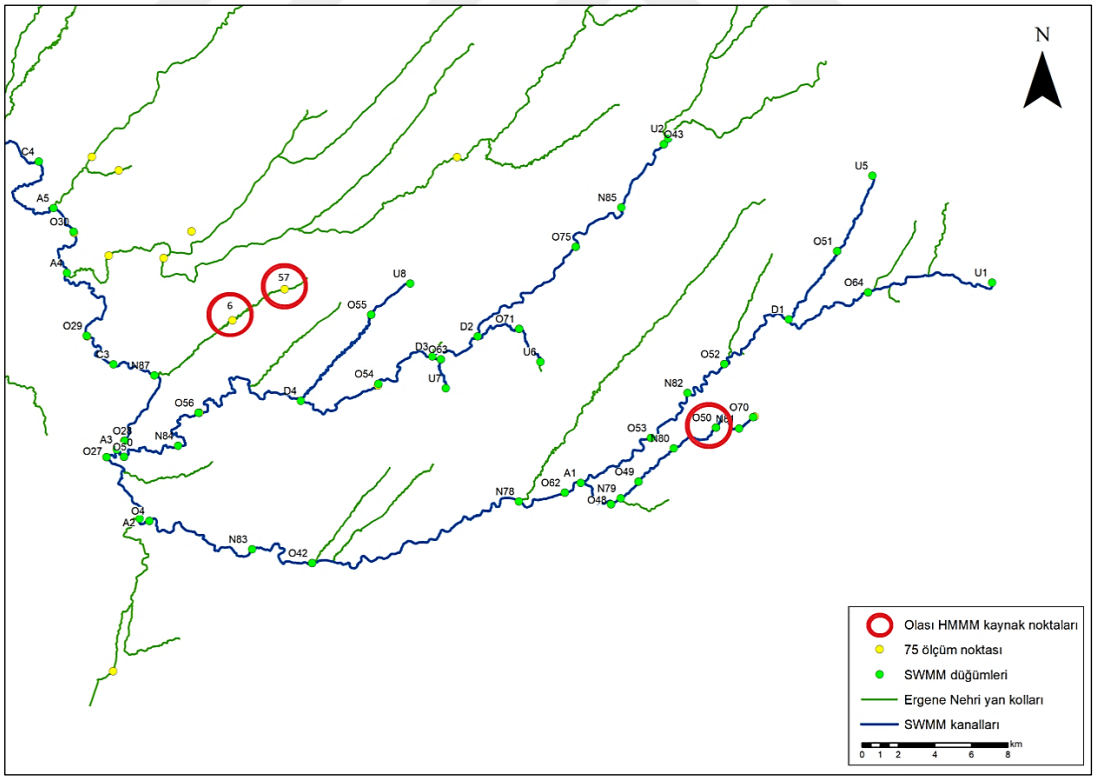
Kasım 2017 Taşınım Modeli, Kasım 2017 Hidrolik Modeli üzerinde kurulmuştur. Yani bu modelin hidrolik özellikleri ve kullanılan akım dağılımı Bölüm 4.3.1'deki model ile aynıdır. Taşınım modeline verilecek kirletici miktarlarının belirlenmesi bir optimizasyon problemi olarak ele alınmış ve çözümü için Bölüm 5.1' de anlatıldığı şekilde 2 yaklaşım kullanılmıştır. Modellenecek kirletici HMMM'dir.



Şekil 5.4. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmamış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi

"Sınırlandırılmamış" olarak isimlendirilen ilk yaklaşımda nehir ağı üzerindeki 51 adet girdi düğümünün tümünde yük girişi olabileceği kabul edilmiştir. Kasım 2017 taşınım modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 51 adet girdiği düğümü için yük girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 88,99 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen yük dağılımı kesikli çizgiler ile gösterilerek Şekil 5.7 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 5.7 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen yük dağımı sonucu oluşan Kütle Süreklilik Şeması Şekil 5.4'de verilmiştir.

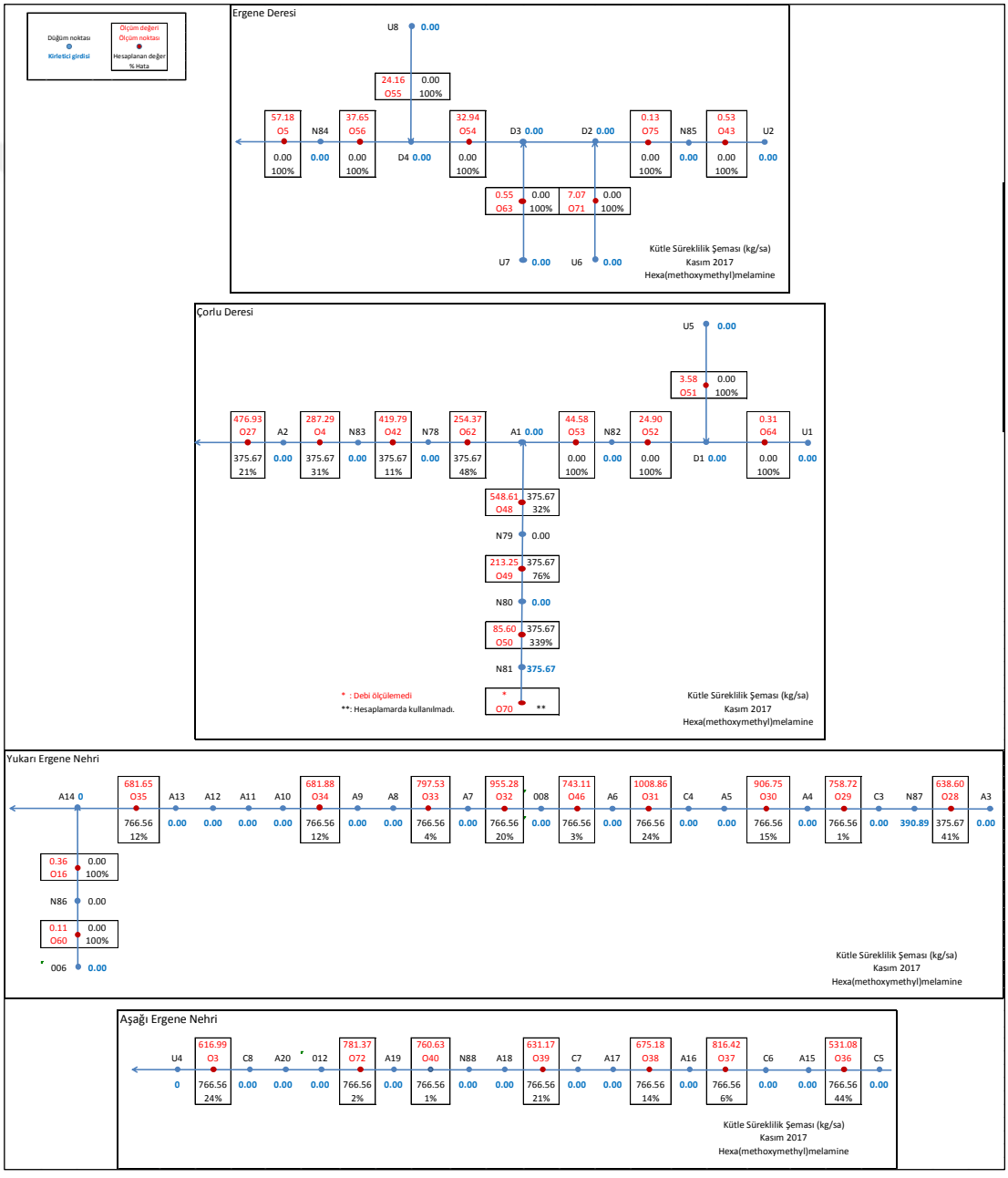
"Sınırlandırılmış" olarak adlandırılan ikinci yaklaşımda girdi düğümü sayısında sınırlandırılmaya gidilmiştir. Bunu yapabilmek için 115Y064 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilen Ergene Nehri'ndeki öncelikli kirleticiler için kaynak belirleme çalışmalarından faydalanılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda HMMM kirleticisinin 6, 57 ve 50 no'lu ölçüm noktalarına yakın endüstriyel tesislerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Şekil 5.5'de bu noktaların konumları gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Olası HMMM kaynak noktalarının harita üzerinde gösterimi

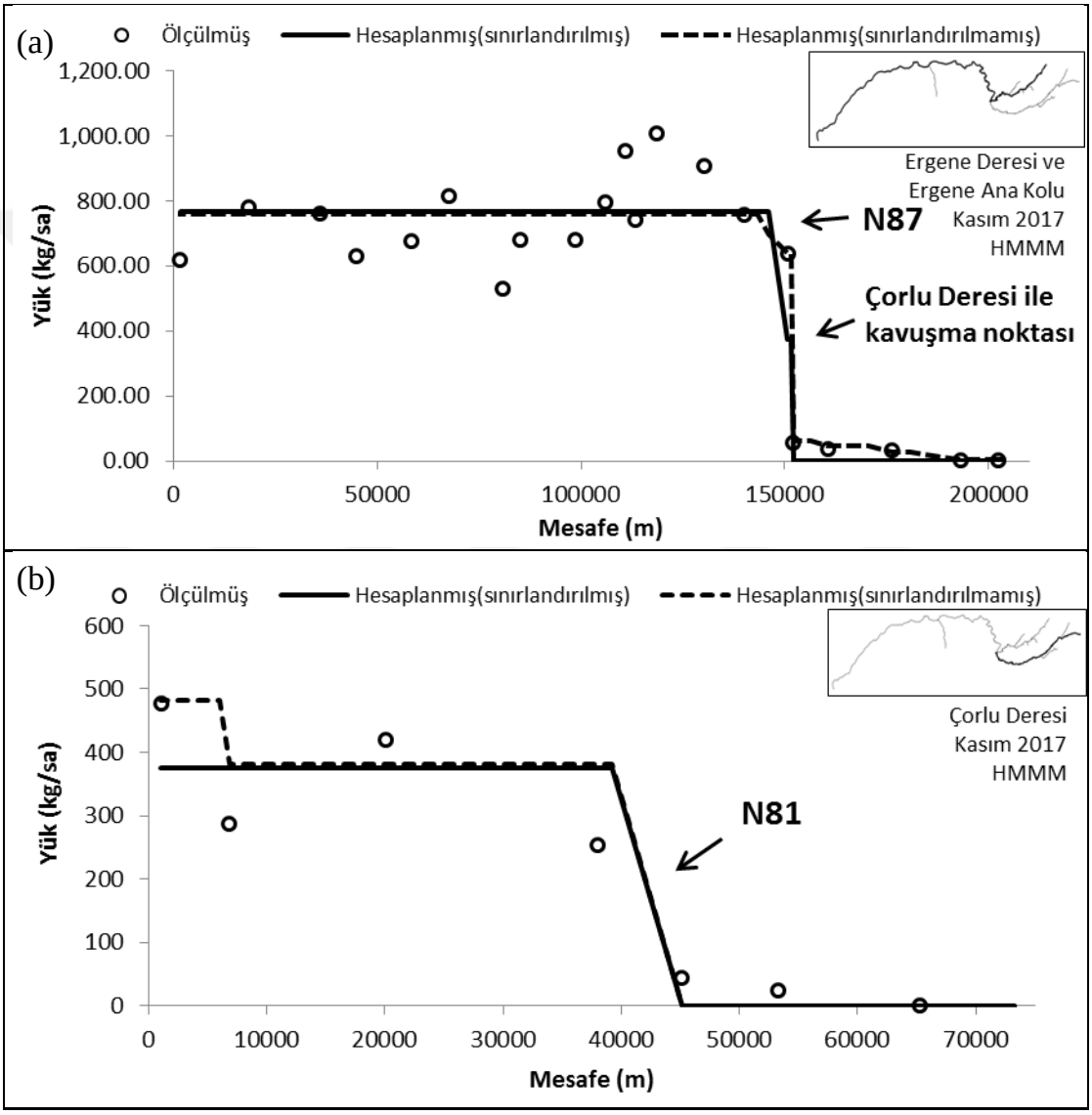
Şekil 5.5'de verilen haritaya bakıldığında 50 numaralı ölçüm noktasını ifade eden O50 düğümü modellenen nehir kolları üzerindedir. Bu noktadaki yükü

hesaplayabilmek için nehre kirletici girdisi hemen üstündeki N81 isimli girdi düğümünden olacaktır. 6 ve 57 numaralı ölçüm noktaları ise nehrin modellenmeyen bir yan kolu üzerinde kalmaktadır. Ancak bu kolun nehir ana kolu ile kavuşma noktası N87 isimli düğüm ile ifade edilmiştir. Kaynak noktalarının ve mevcut düğümlerin konumları göz önüne alınarak kirleticinin girdiği düğümlerin N87 ve N81 olmak üzere 2 tane olmasına karar verilmiştir. Böylece girdi düğümü sayısı 2 olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.6. Kasım 2017 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi

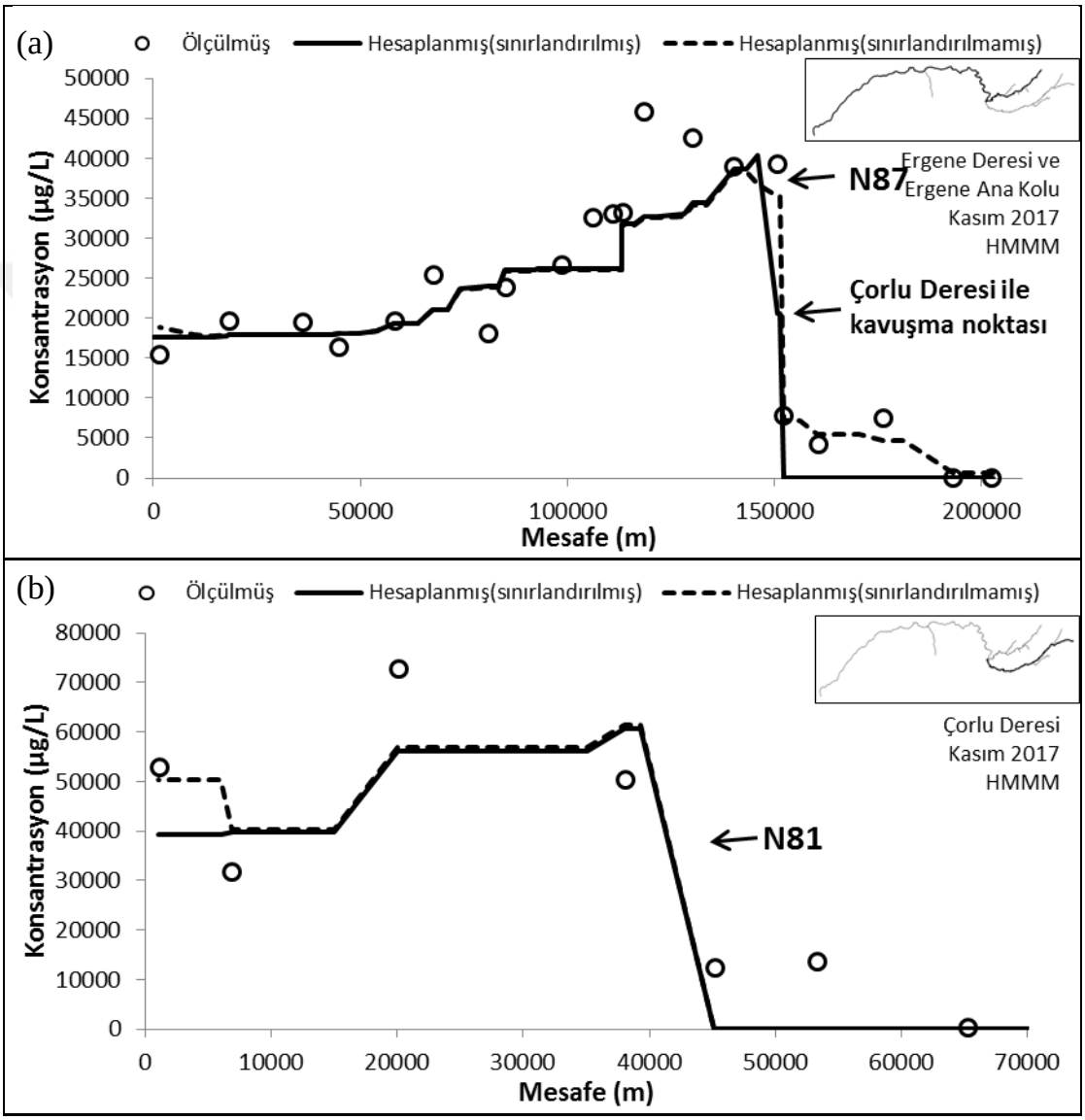
Kasım 2017 Taşınım Modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 2 girdi düğümüne yük girdisi miktarları belirlenmiştir. RMSE değeri 115,14 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen yük dağılımı düz çizgiler ile gösterilerek Şekil 5.7 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 5.7 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen yük dağımı sonucu oluşan Kütle Süreklilik Şeması Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.7. Kasım 2017 Taşınım Modeli için Excel Solver ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük değerleri kullanılarak belirlenen yük dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

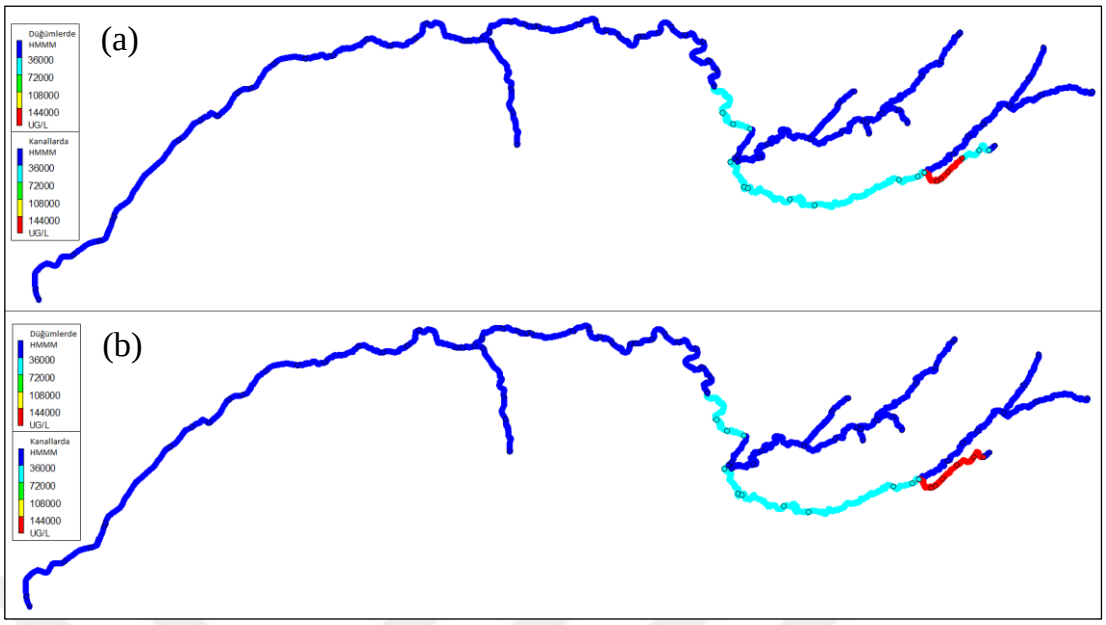
Şekil 5.7'ye bakıldığında Sınırlandırılmış ve Sınırlandırılmamış yaklaşımlar ile belirlenen yük değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. İki yaklaşım

sonucu belirlenen yük girdilerinin kullanıldığı Kasım 2017 taşınım modeli SWMM ile çözülmüş ve Ergene Nehri üzerindeki tüm kanallar ve düğümlerdeki konsantrasyon değerleri modellenmiştir. Şekil 5.8'de kararlı durum model sonuçlarına göre nehir ana kolları boyunca oluşan konsantrasyon dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Kasım 2017 Taşınım Modeli ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük dağılımı kullanılarak modellenen konsantrasyon değerlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Şekil 5.9'da ise tüm nehir kanallarındaki konsantrasyon değerleri SWMM haritası şeklinde gösterilmiştir. Modellenen konsantrasyon değerlerinin ölçülen konsantrasyon değerleri ile uyumlu olduğu söylenebilir



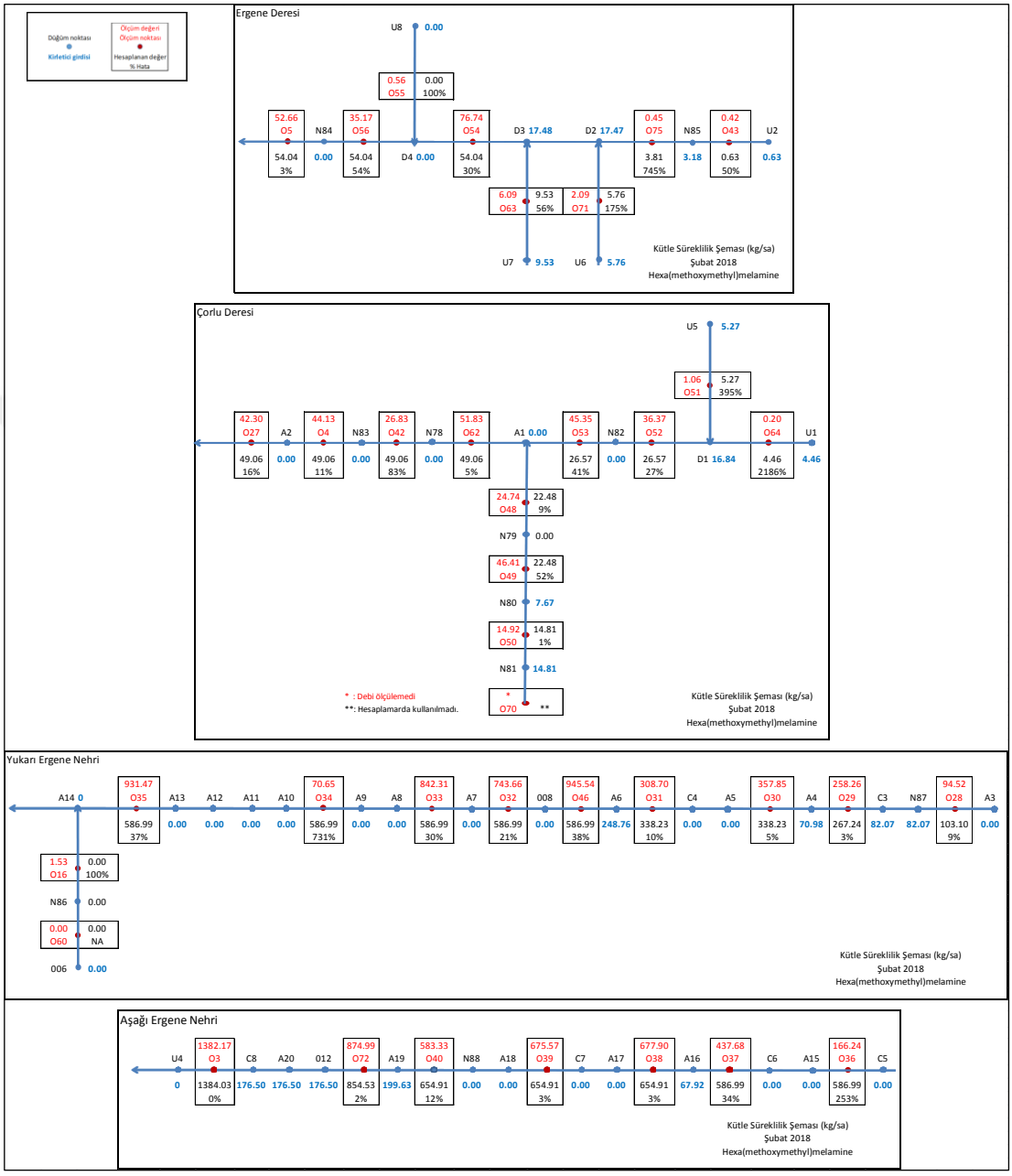
Şekil 5.9. Kasım 2017 Taşınım Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında HMMM konsantrasyonu dağılımı haritası; a) Yük girdi noktalarının sınırlandırılmadığı durum, b) Yük girdi noktalarının olası kirletici kaynaklarını hesaba katarak sınırlandırıldığı durum.

5.2.2. Şubat 2017 Taşınım Modeli

Şubat 2018 Taşınım Modeli, Şubat 2018 Hidrolik Modeli üzerinde kurulmuştur. Yani bu modelin hidrolik özellikleri ve kullanılan akım dağılımı Bölüm 4.3.2'deki model ile aynıdır. Şubat 2018 taşınım modelini geliştirebilmek için yapılan işlemler Bölüm 5.2.1'de anlatılan Kasım 2017 Taşınım Modeli için yapılan işlemler ile aynıdır. Tek fark bu dönem için yapılan işlemlerde Şubat 2018 ölçümleri kullanılmıştır. Kirletici yine HMMM organik kirleticisidir ve kaynakları 6, 57 ve 50 ölçüm noktalarına yakın endüstriyel tesislerdir. Nehre yük girdilerinin belirlenmesi optimizasyon problemi Excel Çözücü eklentisi ile, "Sınırlandırılmamış" ve "Sınırlandırılmış" yaklaşımları ile çözülmüştür.

"Sınırlandırılmamış" olarak isimlendirilen ilk yaklaşımda nehir ağı üzerindeki 51 adet girdi düğümünden yük girişi olabileceği kabul edilmiştir. Şubat 2018 taşınım modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 51 adet girdi düğümü için yük girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 148,26 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen yük dağılımı kesikli çizgiler ile gösterilerek Şekil 5.12 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 5.12 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha

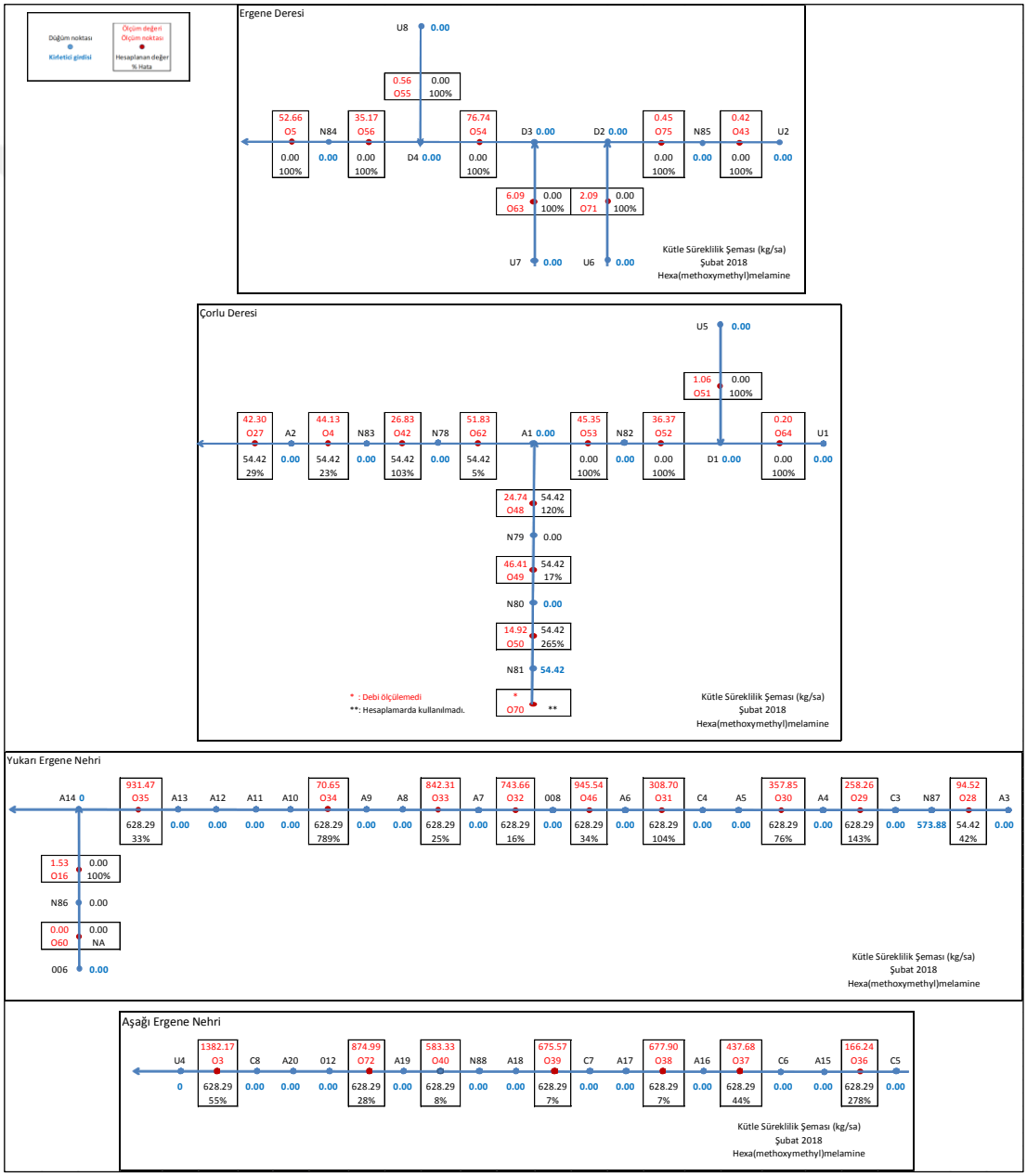
ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen yük dağımı sonucu oluşan Kütle Süreklilik Şeması Şekil 5.10'da verilmiştir.



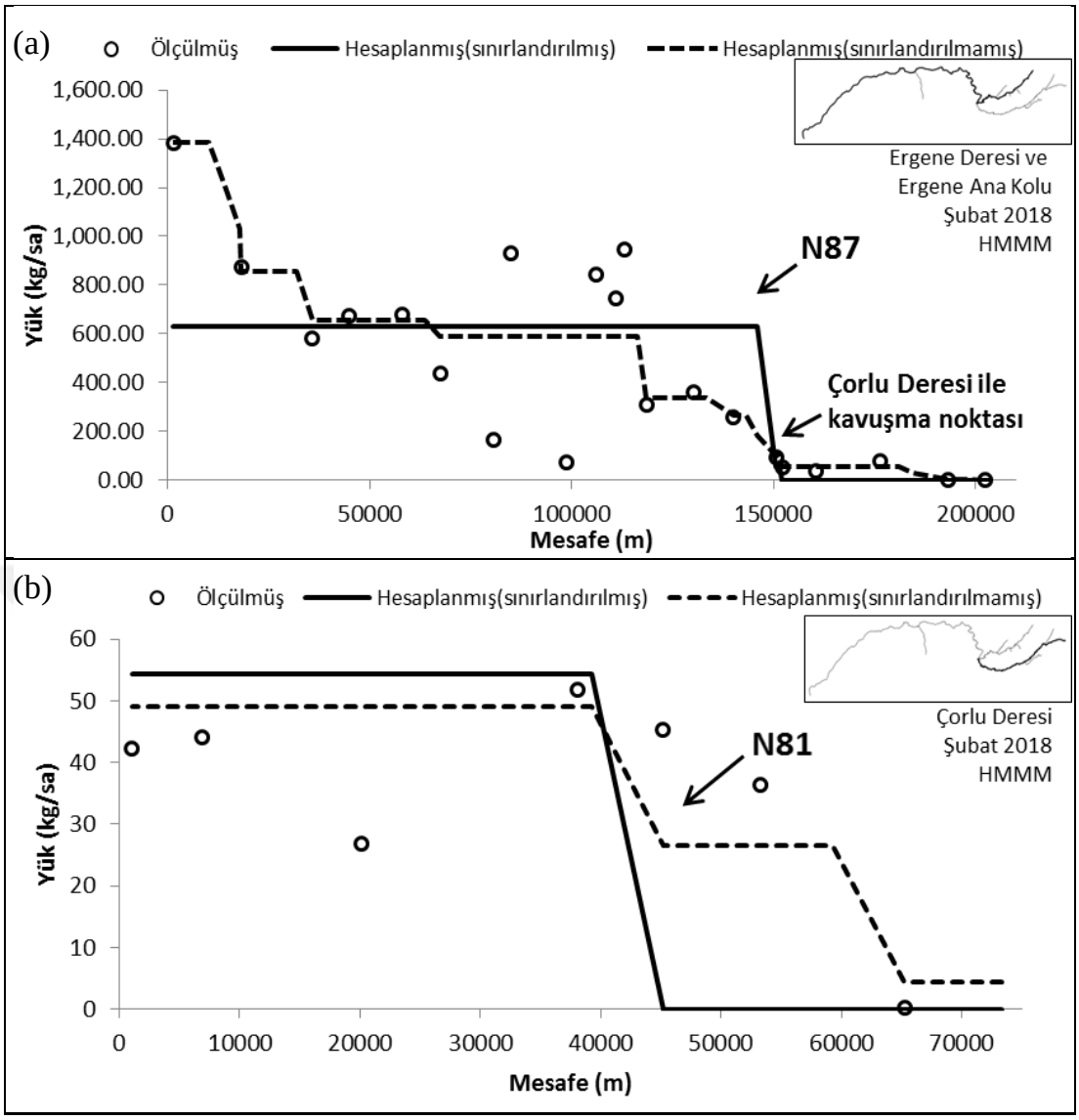
Şekil 5.10. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmamış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi

"Sınırlandırılmış" olarak adlandırılan ikinci yaklaşımda girdi düğümü sayısında sınırlandırılmaya gidilmiştir. Kaynak noktalarının ve mevcut düğümlerin konumları göz önüne alınarak girdi düğümlerinin N87 ve N81 olmak üzere 2 tane olmasına karar verilmiştir (nedenleri Bölüm 5.2.1'de detaylı şekilde anlatılmıştır). Böylece

girdi düğümü sayısı 2 olarak sınırlandırılmıştır. Şubat 2018 taşınım modeli için Çözücü ile nehir üzerindeki 2 karar değişkeni düğümüne yük girdileri belirlenmiştir. RMSE değeri 219,28 ve PBIAS değeri 0,0001 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen yük dağılımı düz çizgiler ile gösterilerek Şekil 5.12 (a)'da Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu boyunca ve Şekil 5.12 (b)'de Çorlu Deresi boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen yük dağımı sonucu oluşan Kütle Süreklilik Şeması Şekil 5.11'da verilmiştir.



Şekil 5.11. Şubat 2018 dönemi için Excel Çözücü ile Sınırlandırılmış yük belirleme yaklaşımı ile belirlenen yüklerin Kütle Süreklilik Şeması üzerinde gösterilmesi

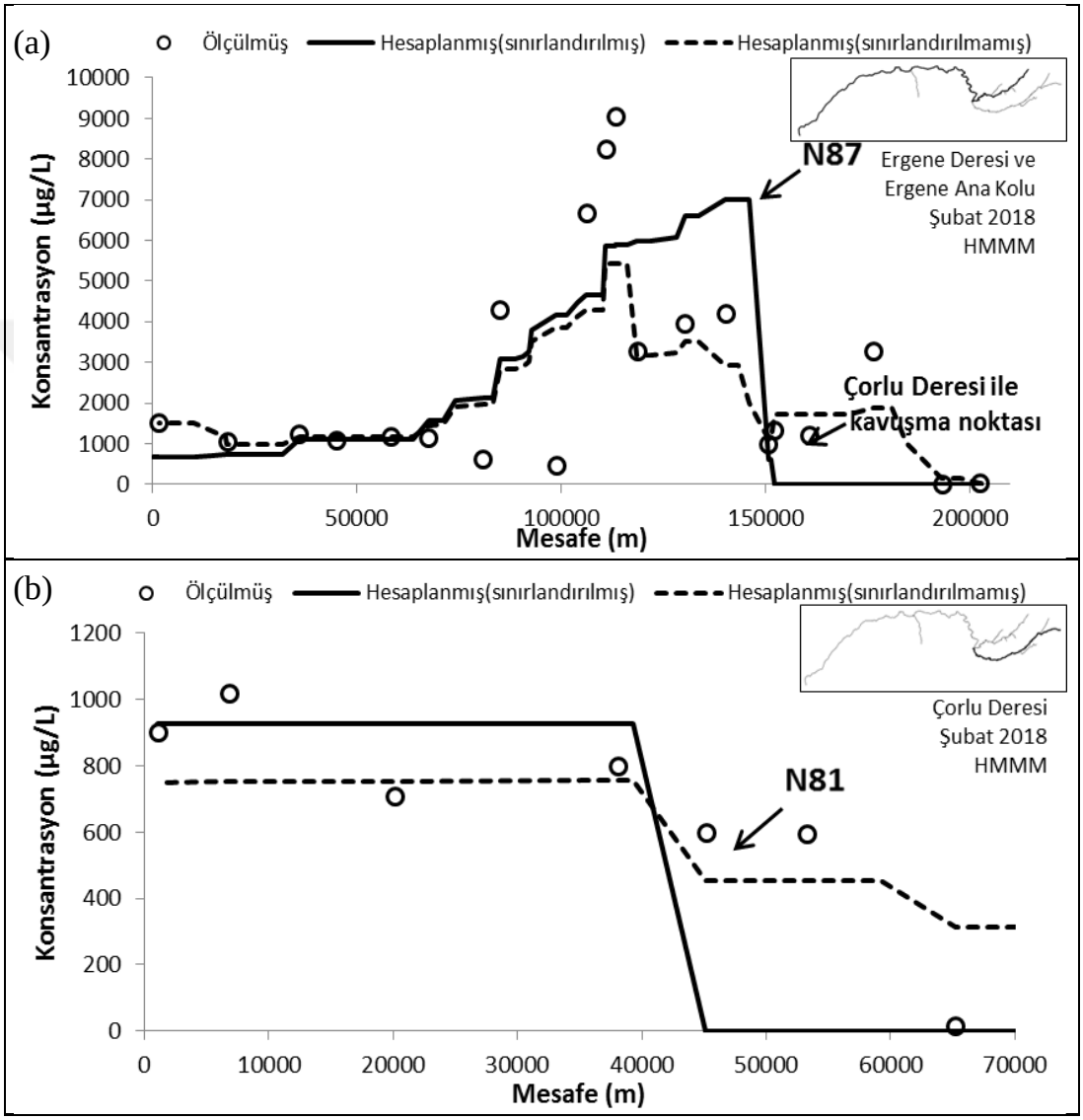


Şekil 5.12. Şubat 2018 Taşınım Modeli için Excel Solver ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük değerleri kullanılarak belirlenen yük dağılımının, nehir ana kolları boyunca saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. m Çorlu Deresi ile 0. m Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Şekil 5.12'e bakıldığında Şubat 2018 dönemi için Sınırlandırılmış ve Sınırlandırılmamış yaklaşımları sonucu belirlenen yükler arasındaki farklar Kasım 2017'dönemine göre daha fazladır. Sınırlandırılmamış yaklaşımı sonucu belirlenen değerlerin gözlemlenen değerleri yakalamada daha iyi olduğu söylenebilir ancak bunu yaparken gözlem hatalarını da sonuçlara yansıtmış olmaktadır.

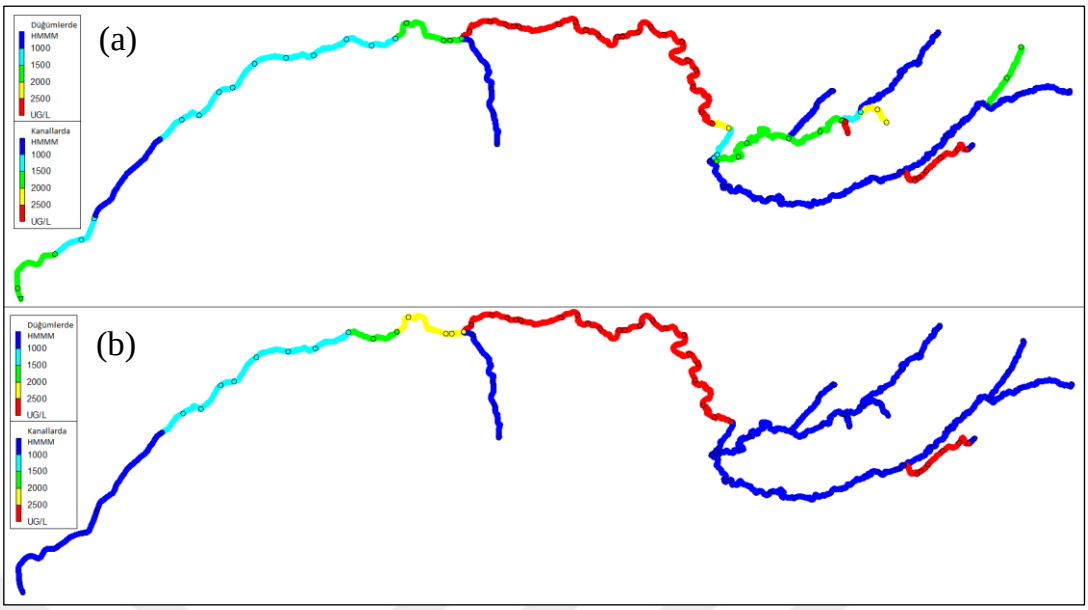
İki yaklaşım sonucu belirlenen yük girdilerin kullanıldığı Şubat 2018 Taşınım Modeli SWMM ile çözülmüş ve Ergene Nehri üzerindeki tüm kanallar ve düğümlerdeki konsantrasyon değerleri modellenmiştir. Şekil 5.13'de kararlı durum

model sonuçlarına göre nehir ana kolları boyunca oluşan konsantrasyon dağılımı gösterilmiştir. Şekil 5.14'de ise tüm nehir kanallarındaki konsantrasyon değerleri SWMM haritası şeklinde gösterilmiştir. Modellenen konsantrasyon değerlerinin ölçülen konsantrasyon değerleri ile uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 5.13. Şubat 2018 Taşınım Modeli ile sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış yük dağılımı kullanılarak modellenen konsantrasyon değerlerinin saha ölçümleri ile karşılaştırılması, a) Ergene Deresi ve Ergene Ana Kolu (151442. metre Çorlu Deresi ile 0. metre Meriç Nehri ile birleşim noktasıdır.)

Şekil 5.14'de tüm nehir kanallarındaki konsantrasyon değerleri SWMM haritası şeklinde gösterilmiştir. Modellenen konsantrasyon değerlerinin ölçülen konsantrasyon değerleri ile uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 5.14. Şubat 2018 Taşınım Modeli sonuçlarına göre akarsu ağında HMMM konsantrasyonu dağılımı haritası; a) Yük girdi noktalarının sınırlandırılmadığı durum, b) Yük girdi noktalarının olası kirletici kaynaklarını hesaba katarak sınırlandırıldığı durum.

5.3. Uzun Dönem Taşınım Modelleri

Uzun dönem su kalitesi modelleri, uzun dönem hidrolik modellerin altyapısı üzerine kirletici parametrelerinin ve kirletici yük girdileri değerlerinin tanıtılması ve SWMM yazılımının hidrolik modelleme modülünün yanında su kalitesi modelleme modülünün de etkinleştirilmesi ile oluşturulmuşlardır. Uzun dönem su kalitesi modellerine, birlikte çözüldükleri uzun dönem hidrolik modelleri ile aynı isimler verilmiştir (71 Alt-havzalı Taşınım Modeli ve Nokta34 Taşınım Modeli). Model benzeşimleri HMMM kirleticisi için gerçekleştirilmiştir. HMMM kirleticisinin nehre salınım noktaları ve yükleri, yukarıda açıklanan yük belirleme yöntemiyle (Bölüm 5.1) ve kaynak noktalarının sınırlandırılması yaklaşımıyla belirlenmiştir. Bu yöntem ile Kasım 2017 ve Şubat 2018 gözlem dönemleri için belirlenen yük değerleri, kendi dönemlerine ait kararlı durum taşınım modellerinde kullanılmışlardır (dönemler için sırasıyla Bölüm 5.2.1 ve 5.2.2). Uzun dönem taşınım modeli uygulamalarında bu iki set yük girdisi dağılımının yanında Mayıs 2018 gözlem dönemi için yine aynı yöntemle belirlenmiş yük dağılımı seti kullanılmıştır. Model benzeşimlerinde kullanılan yük dağılımı Tablo 5.1' de verilmiştir. HMMM yüklerinin modelleme periyodu boyunca sabit ve sürekli olduğu varsayılmıştır. Üç ayrı yük girdisi seti ile, yük girdilerini benzeşim boyunca sabit tutarak, üç ayrı benzeşim gerçekleştirilmiştir.

Benzeşimler sonucunda iki ayrı hidrolik modelin temsil ettiği dönemler için nehir hidroliğindeki günlük değişimlerin nehir-içi kirletici konsantrasyonlarına etkisi incelenmiştir. Modellenmiş konsantrasyon değerleri, nehir-içi su kirliliğini yansıtmada kritik öneme sahip olduğu belirlenmiş olan 34 numaralı gözlem noktasında ölçülmüş konsantrasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.2).

Tablo 5.1. Uzun dönem su kalitesi modellerinde kullanılan HMMM kirleticisi yük girdileri.

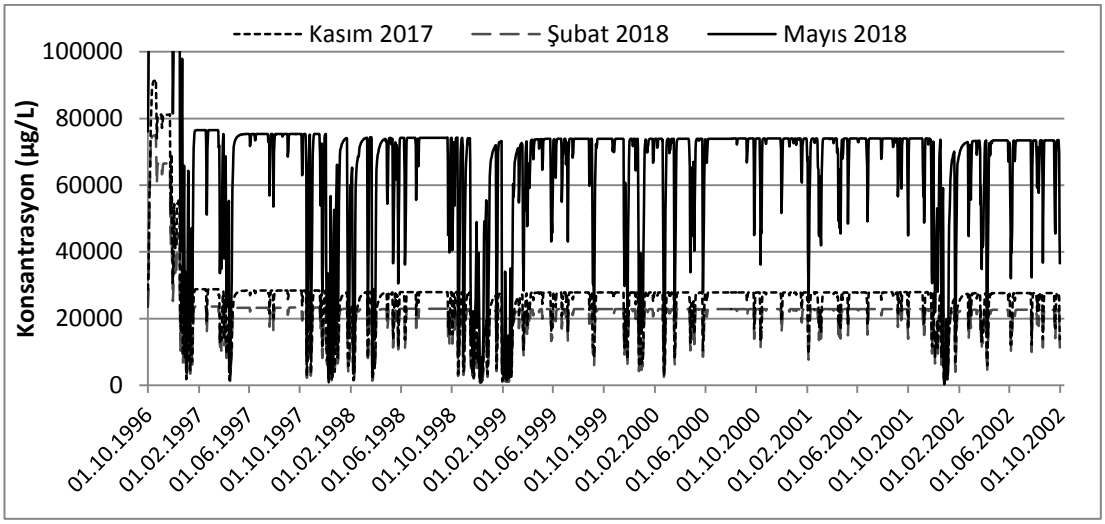
Kirletici salınımının yapıldığı model düğüm noktası (Şekil 5.5)	Yük (kg/sa)		
	Kasım 2017	Şubat 2018	Mayıs 2018
N81	375,67	54,42	560,45
N87	390,89	573,88	1474,52

Tablo 5.2. Ölçülmüş HMMM konsantrasyonları (34 numaralı gözlem noktası)

	Yabataş Konsantrasyon (µg/L)			
	Ağustos (2017)	Kasım (2017)	Şubat (2018)	Mayıs (2018)
O34	45510.737	26677,555	478,669	13168,221

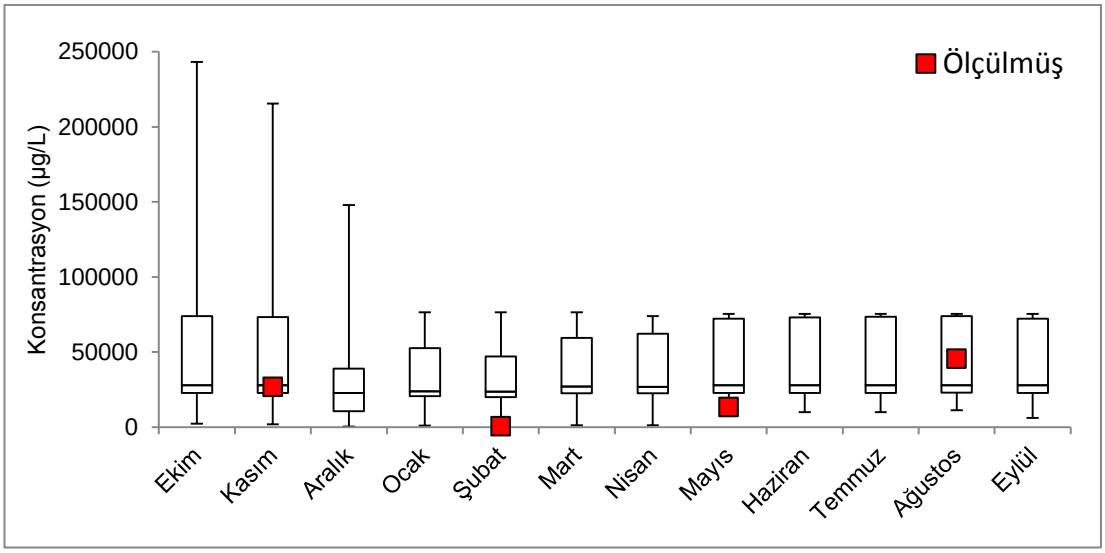
5.3.1. 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli

71 Alt-havzalı Taşınım Modeli 1997-2002 yılları için, gözlem verilerine dayalı olarak belirlenmiş üç ayrı yük girdisi seti ile çalıştırılmıştır (Tablo 5.1). Nehir-içi su kirliliğini yansıtmada kritik öneme sahip olduğu belirlenmiş olan 34 numaralı gözlem noktasında, HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi aşağıda sunulmuştur (Şekil 5.15). Model sonuçları yağışlı dönemlerde nehir debilerindeki artışın konsantrasyon değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. En yüksek konsantrasyonlara yaz aylarına denk gelen kurak dönemlerde ulaşılmaktadır. Hesaplanan yük girdilerine göre kurak dönemlerde ulaşılan en yüksek konsantrasyonlar 23000 µg/L ile 75000 µg/L arasındadır. En yüksek konsantrasyonlar en yüksek yük girdisi değerlerine sahip olan Mayıs 2018 seti ile yapılan simülasyonlarda hesaplanmıştır. Benzeşim başlangıcında (2016 Ekim ayı) konsantrasyon değerlerinde görülen dalgalanmalar modelin "ısınma (warm-up)" döneminde ortaya çıkan nümerik hatalardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.15. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin sonuçlarına göre 34 numaralı gözlem noktasında HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi

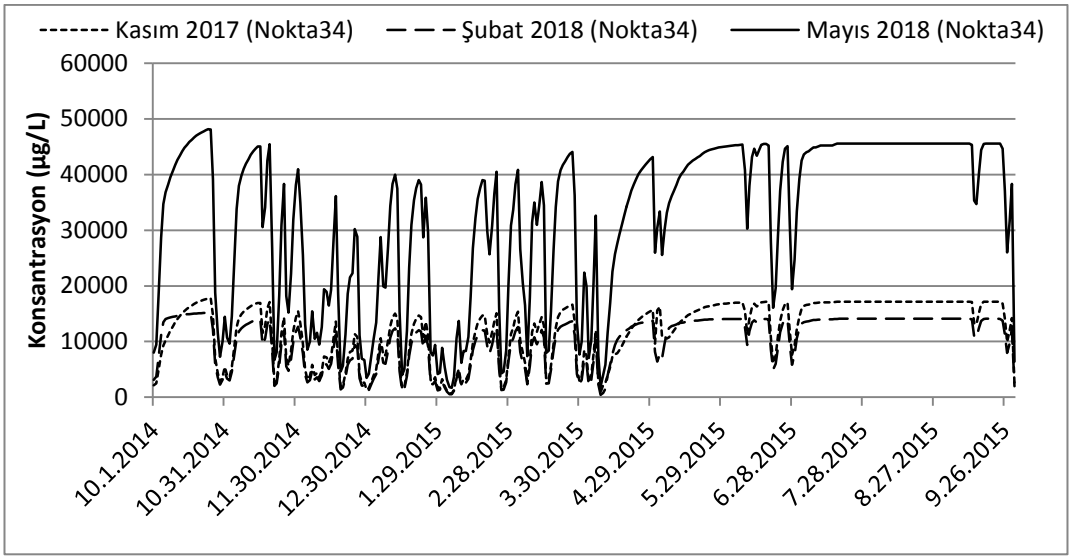
71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin çalıştırıldığı 6 ayrı su yılı için, farklı aylar için modellenmiş konsantrasyonlar, 34 numaralı gözlem noktasında ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16). Şubat ve Mayıs ayı gözlem döneminde ölçülmüş konsantrasyonlar, farklı su yılları için ve farklı yük girdisi tahminleri ile yapılan hidrolik ve taşınım benzeşimleri sonucu farklı aylarda hesaplanmış konsantrasyonlardan daha düşük seviyededirler. Bunun nedeni Şubat ve Mayıs gözlem dönemlerinde ölçüm anındaki debinin modellenen yıllardaki debi ortalamalarından daha yüksek olmasıdır. Bununla beraber yük girdilerinin hesaplanmasında kullanılmayan Ağustos ayı gözlem döneminde ölçülmüş değerlerin hesaplanan konsantrasyon değerleri aralığı içinde kaldığı görülmektedir. Bu sonuç, hesaplanan yük girdilerinin ve geliştirilen hidrolik ve taşınım modellerinin Ergene Nehri'ndeki HMMM kirliliğini yansıtmada başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.16. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin 6 ayrı su yılı için hesapladığı aylık HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası)

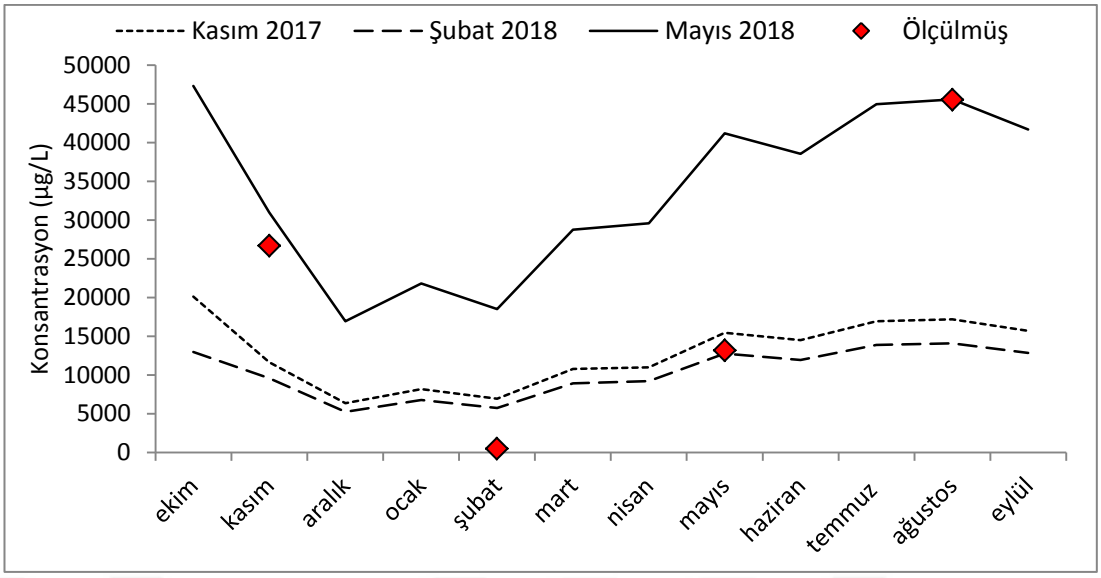
5.3.2. Nokta34 Taşınım Model

Nokta34 Taşınım Modeli 2015 su yılı için gözlem verilerine dayalı olarak belirlenmiş üç ayrı yük girdisi seti ile (Tablo 5.1) çalıştırılmıştır. Nehir-içi su kirliliğini yansıtmada kritik döneme sahip olduğu belirlenmiş olan 34 numaralı gözlem noktasında, HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.17'de sunulmuştur. Model sonuçları yağışlı dönemlerde nehir debilerindeki artışın konsantrasyon değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. En yüksek konsantrasyonlara yağışın az olduğu Temmuz-Eylül döneminde ulaşılmaktadır. Hesaplanan yük girdilerine göre kurak dönemlerde ulaşılan en yüksek konsantrasyonlar 13000-45000 µg/L arasındadır. En yüksek konsantrasyonlar en yüksek yük girdisi değerlerine sahip olan Mayıs 2018 seti ile yapılan benzeşimlerde hesaplanmıştır. Nokta34 Taşınım Modeli ile hesaplanan en yüksek konsantrasyon değerleri, 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli'nin hesapladığı maksimum konsantrasyon değerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni 71 alt-havzalı modelin kalibrasyonunda kullanılan eski (1997-2002) AGİ verilerinin havzada yaşanan sanayileşmenin ardından kurak dönemlerde nehir debilerinde endüstriyel deşarjlardan kaynaklı artışı içermemesinden kaynaklı olabilir. Nokta34 modeli geliştirilirken en güncel hidrolojik verilerin kullanılmış ve Ergene Nehri'ne yapılan önemli atıksu deşarjları da hesaba katılmıştır.



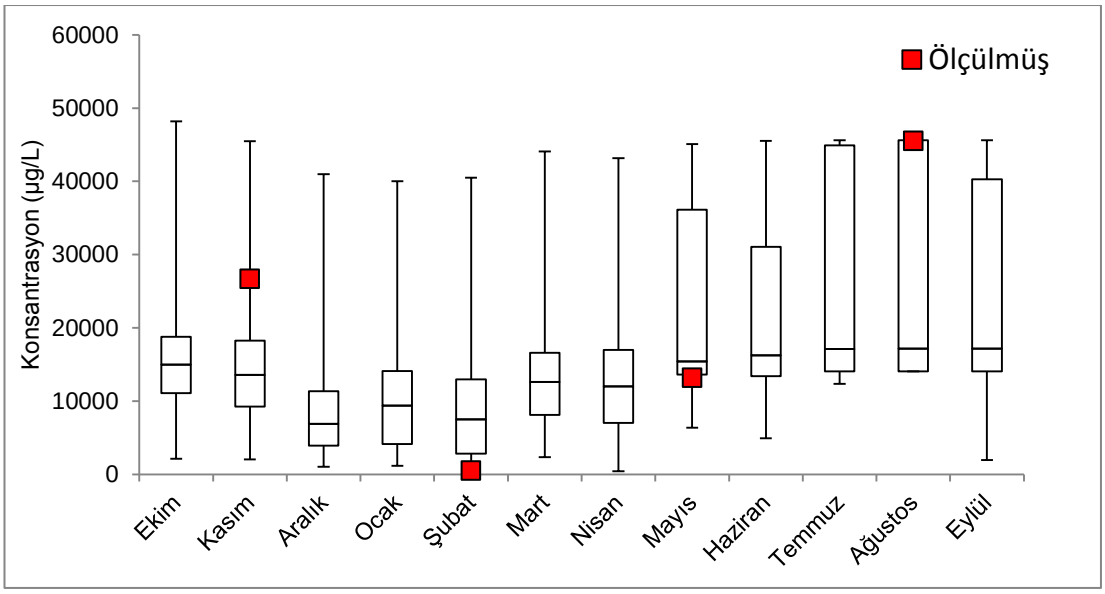
Şekil 5.17. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin sonuçlarına göre 34 numaralı gözlem noktasında HMMM konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimi

Nokta34 Taşınım Modeli'nin çalıştırıldığı su yılı için, modellenmiş aylık ortalama konsantrasyonlar 34 numaralı gözlem noktasında ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.18). Yük girdilerinin hesaplanmasında kullanılmayan Ağustos ayı gözlem döneminde ölçülmüş değerler, Mayıs 2018 yük girdisi seti ile hesaplanan konsantrasyon değerlerine çok yakındır. Mayıs 2018 yük girdisi seti ile 34 numaralı gözlem noktasında hesaplanan konsantrasyonlar, Kasım ayı için de ölçülmüş konsantrasyona yakın değerdedirler. Sadece Şubat ayı döneminde ölçülmüş konsantrasyonlar hesaplanan konsantrasyon aralığının altında bir değerdedir. Bunun nedeni, 71 alt-havzalı model sonuçlarında olduğu gibi, Şubat ayı gözlem döneminde ölçülen debinin ortalama değerlerin çok üzerinde bir değerde olmasıdır. Bu sonuç, hesaplanan yük girdilerinin, ve hidrolik ve taşınım modellerinin Ergene Nehri'ndeki HMMM kirliliğini yansıtmada başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.18. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin hesapladığı aylık ortalama HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası)

Ayrıca, Nokta34 Taşınım Modeli'nin çalıştırıldığı su yılı için, farklı aylarda modellenmiş tüm konsantrasyon değerleri 34 numaralı gözlem noktasında ölçülmüş konsantrasyonlar ile kutu grafiği aracılığıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 5.19).



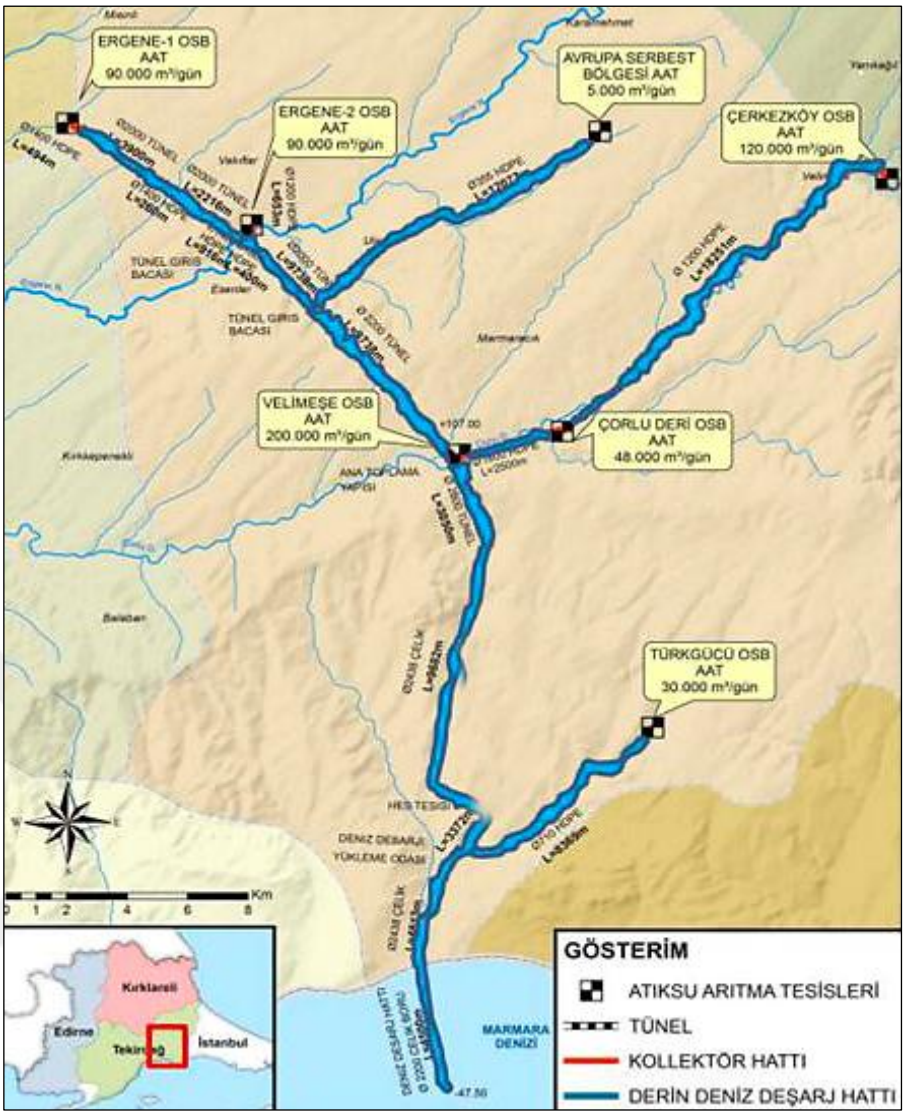
Şekil 5.19. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 Taşınım Modeli'nin 2015 su yılı için hesapladığı aylık HMMM konsantrasyonlarının ölçülmüş konsantrasyonlar ile karşılaştırılması (34 numaralı gözlem noktası)

6. MODEL UYGULAMASI: ERGENE DERİN DENİZ DEŞARJI PROJESİ'NİN ERGENE NEHRİ SU KALİTESİNE ETKİSİ

Proje çalışmaları kapsamında üretilen Ergene Havzası'ndaki mevcut kirlilik bilgisi ve geliştirilen su kalitesi modelleri kullanılarak bir modelleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulama ile Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi'nin Ergene Nehri su kalitesine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi ile Ergene Nehri'nin kirlilik yükünü azaltmak amacıyla nehrin memba kısımlarında yoğun olarak bulunan organize sanayi bölgelerine (OSB) ait atıksu arıtma tesisi deşarj sularının inşa edilecek bir atıksu taşıma hattı ile iletilerek Tekirdağ açıklarında Marmara Denizi derinine deşarj edilmesi planlanmaktadır (Şekil 6.1) (Türkiye Barolar Birliği, 2015).

Derin deniz deşarjının nehre etkisini incelemek üzere yapılacak model benzeşimlerinde Nokta34 hidrolik ve taşınım modelleri temel alınmıştır. Bunun nedeni Nokta34 Hidrolik Modeli geliştirilirken en güncel hidrolojik verilerin kullanılmış olmasıdır. Nokta34 modelinde ayrıca Ergene Nehri'ne yapılan önemli atıksu deşarjları da hesaba katılmıştır. Derin deniz deşarjı senaryosunun benzeşimi için Ergene Derin Deniz Deşarjı projesi kapsamında atıksuları toplanacak olan OSB'lerin nehre yaptıkları su deşarjları ve kirletici deşarjları, Nokta34 hidrolik ve taşınım modellerinden çıkarılarak yeni bir model oluşturulmuştur. Yeni modele Ergene Derin Deniz Deşarjı (EDDD) modeli adı verilmiştir. Nokta34 modelinde nehre yaptıkları atıksu deşarjları dahil edilen ancak EDDD modelinde bu deşarjları yok sayılan OSB'ler şunlardır: Avrupa Serbest Bölgesi, Çerkezköy OSB, Ergene 1 OSB, Ergene 2 OSB, Velimeşe OSB (Deşarj-01), Yalıboyu-Kapaklı-Veliköy OSB (Tablo 4.4).

EDDD modeli benzeşimleri HMMM kirleticisi için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Nokta34 modeli sonuçları ile karşılaştırılarak derin deniz deşarjı projesi gerçekleştikten sonra nehir-içi HMMM konsantrasyonlarında görülecek olası değişiklikler incelenmiştir.

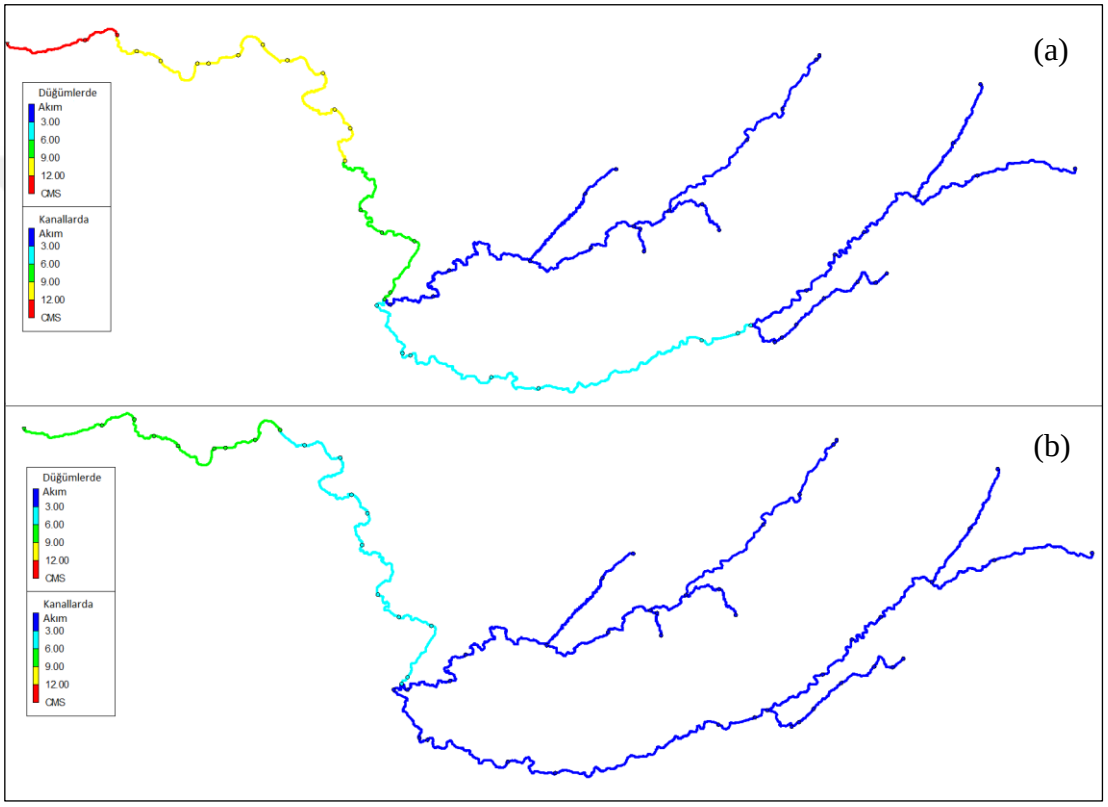


Şekil 6.1. Ergene ve Çorlu derelerindeki önemli atıksu deşarjları ve derin deniz deşarjı hattının gösterimi (Türkiye Barolar Birliği, 2015)

EDDD modeli ile yapılan kirletici taşınımı benzeşimlerinde HMMM kirleticisinin kullanılmasının sebebi, bu kirleticinin kritik öneminin yanı sıra, iki ana kaynağından Çorlu Deresi üzerinde olanın derin deniz deşarjına yönlendirilirken yukarı Ergene Nehri üzerinde kalan kaynağın deniz deşarjı projesi kapsamında olmamasıdır (Şekil 5.5). Bu durum EDDD model benzeşimlerinde SWMM düğüm noktalarından N81'e yapılan HMMM salınımının sıfırlanması, fakat N87 numaralı düğüm noktası için No34 modeli ile aynı yük girdilerinin kullanılması ile ifade edilmiştir (Tablo 5.1 ve Tablo 5.2).

Derin deniz deşarjı projesinin faaliyete geçmesinin ardından Ergene Nehri'ne yapılan kirletici girdilerinin yanı sıra su girdileri de azalacaktır. Özellikle nehirde akan suyun

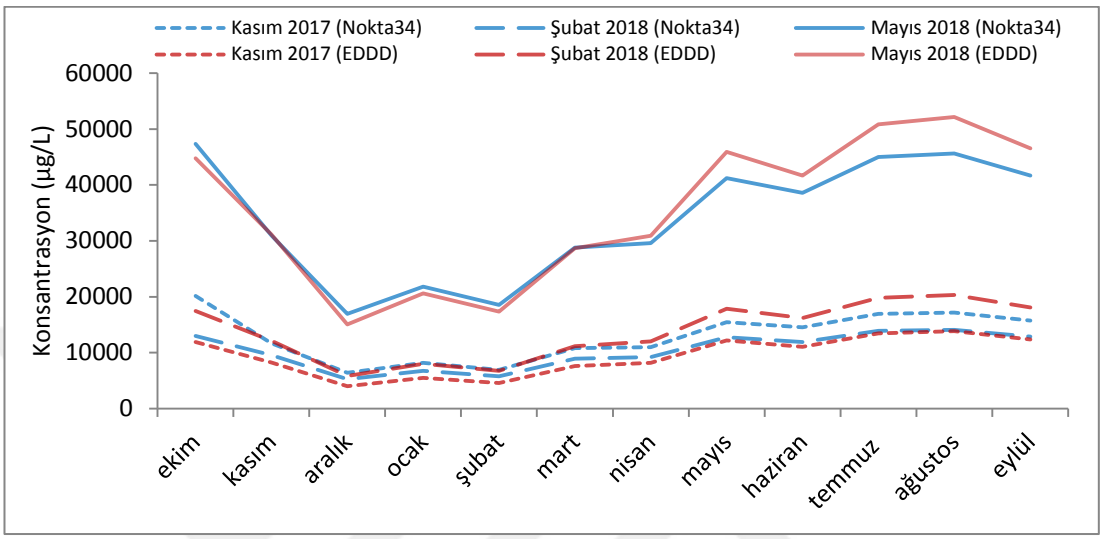
önemli bölümünün atıksu deşarjları olduğu yaz aylarında (Temmuz-Ağustos) derin deniz deşarjı projesinin etkisinin daha belirgin olması beklenebilir. Aşağıda Nokta34 Hidrolik Modeli'nde en kurak dönemi temsil eden 15 Ağustos günü için nehir-içi akım dağılımı haritaları Nokta34 ve EDDD modelleri sonuçları kullanılarak çizilmiştir (Şekil 6.2). Model sonuçları derin deniz deşarjı projesi sonrası, kurak dönemlerde nehir-içi akımlarda önemli miktarda azalma beklenebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 6.2. Modellenmiş nehir-içi akım dağılımı haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (Ergene Deniz Deşarjı Projesi öncesi), b) EDDD modeli (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası)

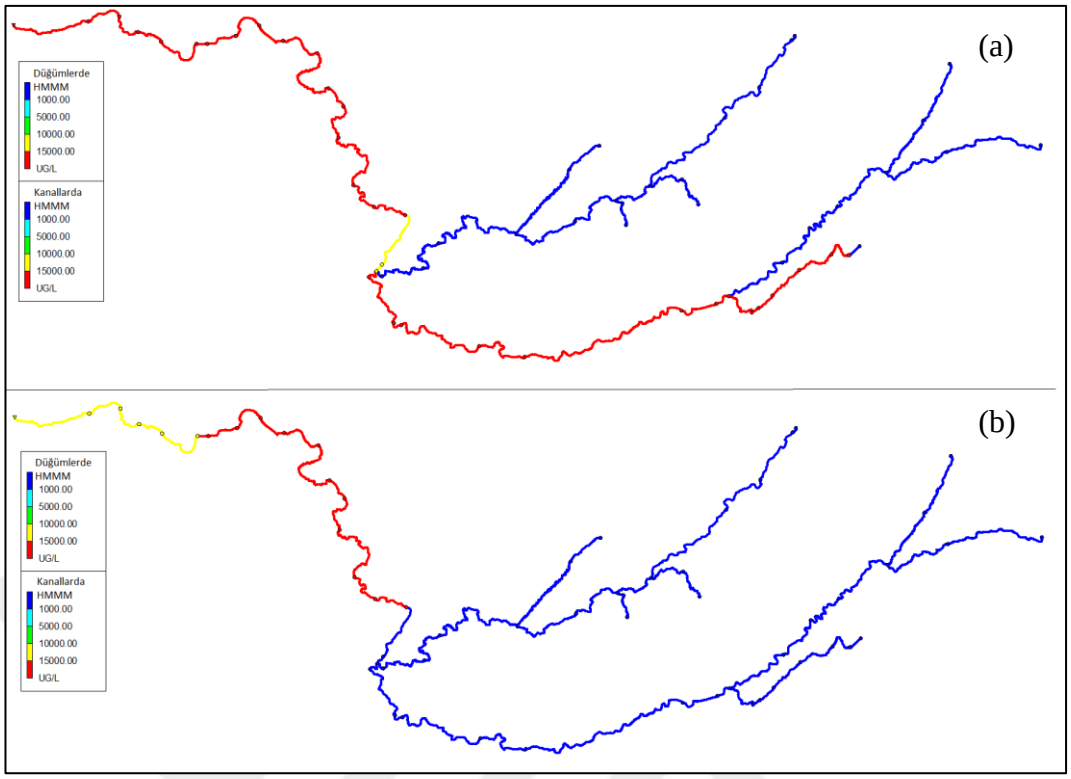
Nokta34 ve EDDD modelleri tarafından üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018 ve Mayıs 2018) (Tablo 5.1) kullanılarak hesaplanan aylık ortalama konsantrasyonlar, nehir-içi su kirliliğini yansıtmada kritik öneme sahip olduğu belirlenmiş olan 34 numaralı gözlem noktasında karşılaştırılmıştır (Şekil 6.3). Farklı yük girdisi setleri ile hesaplanan konsantrasyonlar kış aylarında her iki modelde de birbirine yakındır. Yağışların yoğun olduğu bu aylarda, 34 numaralı gözlem noktasında, konsantrasyon değerlerinde derin deniz deşarjı projesi sonrası bir miktar azalma görülmektedir. Ancak yaz ayları için, Şubat 2018 ve Mayıs 2018 yük girdisi

setleri ile yapılan hesaplamalar 34 numaralı gözlem noktasında derin deniz deşarjı projesi sonrası artış tahmin etmektedir. Kasım 2018 yük girdisi setleri ile yapılan benzeşimlerde ise yaz aylarında derin deniz deşarjı projesi sonrası konsantrasyonlarda azalma görülmektedir.

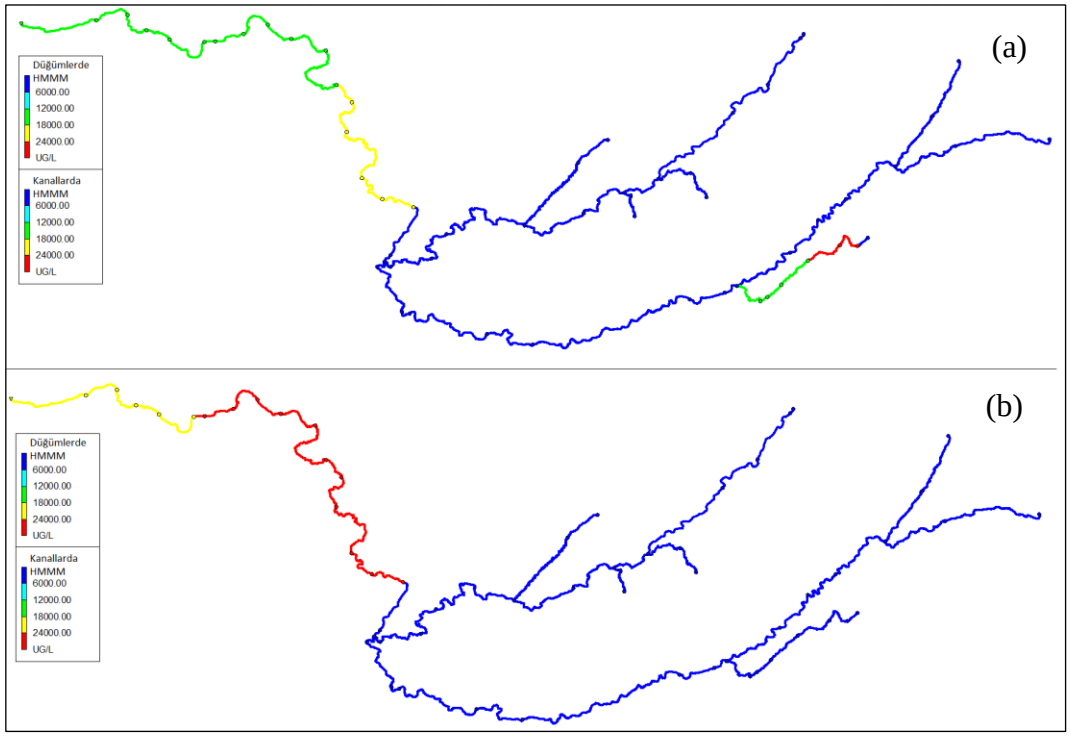


Şekil 6.3. Üç ayrı yük girdisi seti (Kasım 2017, Şubat 2018, Mayıs 2018) ile çalıştırılan Nokta34 (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi öncesi) ve EDDD (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası) taşınım modellerinin hesapladığı aylık ortalama HMMM konsantrasyonları (34 numaralı gözlem noktası).

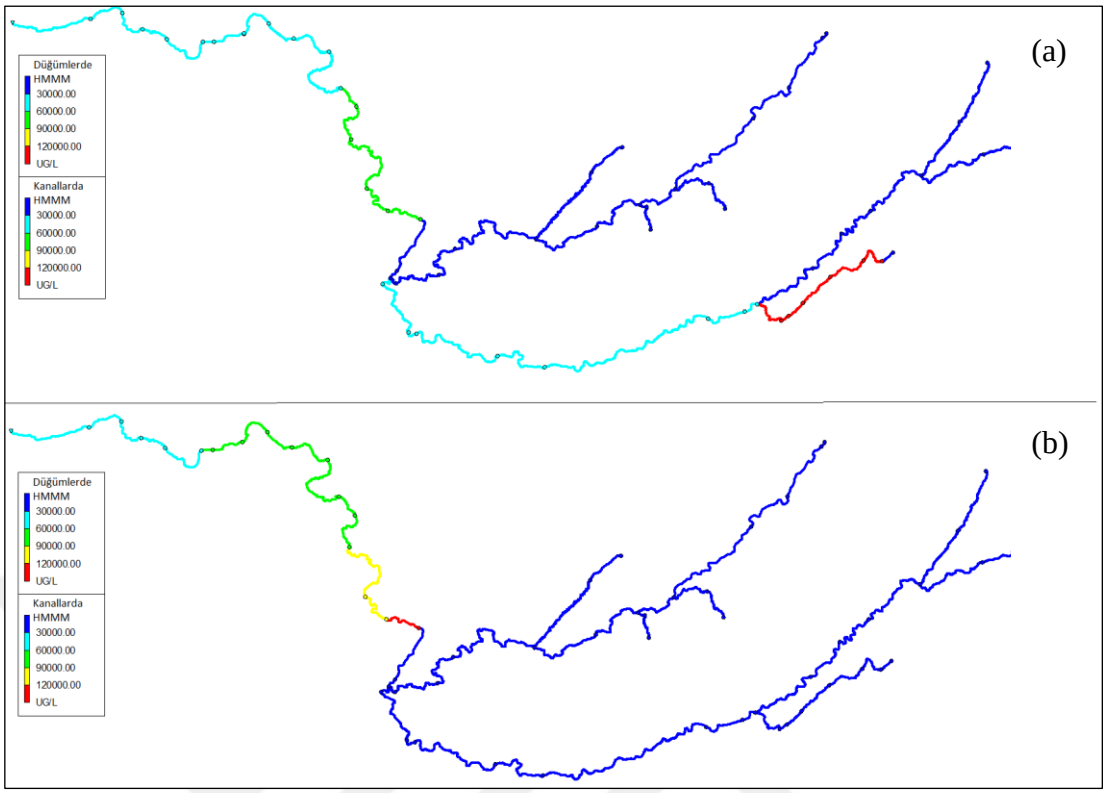
Farklı yük girdisi veri setleri ile yapılan model benzeşimleri sonuçlarına göre tüm nehir kollarındaki HMMM konsantrasyonları kurak dönemi temsil eden 15 Ağustos günü için haritalandırılmıştır (Şekil 6.4). Tüm yük girdisi veri setleri ile yapılan benzeşimlerde Çorlu Deresi HMMM konsantrasyonlarında derin deniz deşarjı projesi sonrası azalma görülmektedir. Ancak Şubat 2018 ve Mayıs 2018 yük girdisi setleri ile yapılan benzeşimlerde N87 düğüm noktası sonrasında, kurak dönem için, derin deniz deşarjı projesi sonrası artış görülmektedir.



Şekil 6.4. Kasım 2017 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi sonrası)



Şekil 6.5. Şubat 2018 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (EDDD projesi sonrası)



Şekil 6.6. Mayıs 2018 yük girdileri ile modellenmiş HMMM konsantrasyonu haritaları (15 Ağustos – kurak dönem). a) Nokta34 modeli (EDDD projesi öncesi), b) EDDD modeli (EDDD projesi sonrası)

Kasım 2017 yük girdisi seti en düşük yük değerlerine sahip settir (Tablo 5.1). Bu veri setinde N81 ve N87 düğüm noktalarından yapılan yük girdileri birbirine yakındır. Şubat 2018 ve Mayıs 2018 yük girdisi setlerinde ise derin deniz deşarjı projesi kapsamı dışında kalan yukarı Ergene Nehri kısmında bulunan N87 düğüm noktasından yapılan yük girdileri Çorlu Deresi üzerindeki N81 noktasındaki yük girdilerinden çok daha yüksektir. Derin deniz deşarjı projesi sonrası nehre salınmaya devam eden yüksek yük girdisi, proje sonrası azalan atıksu girdileri ve yaşanan kurak dönem ile birleşince HMMM kirleticisinin konsantrasyonları N87 düğüm noktasının mansabında artmıştır (Şekil 6.5 ve Şekil 6.6).

Ergene Derin Deniz Deşarjı projesinin nehir-içi kirletici konsantrasyonlarına etkisini incelemek üzere gerçekleştirilen model benzeşimleri sonucu şu çıkarımlarda bulunulabilir:

- Ergene Derin Deniz Deşarjı projesi sonrası Ergene Deresi ve Çorlu Deresi'nde kirletici konsantrasyonları büyük ölçüde azalacaktır. Ancak Derin deniz deşarjı

projesi kapsamı dışında kalan kaynak yükleri derin deniz deşarjına yönlendirilen kaynak yüklerinden daha fazla olan kirleticiler için, nehir-içi akımlarının çok azaldığı kurak yaz dönemlerinde Ergene Nehri ana kolunun üst kısımlarında yüksek konsantrasyonlar görülmeye devam edilebilir.

- 115Y064 numaralı proje kapsamında yapılan çalışmalarda HMMM'in biyolojik bozunuma uğramadığı ve geleneksel yöntemlerle arıtılamadığı tespit edilmiştir (Tezel ve diğ., 2019). Bu gibi kirleticilerin uygun arıtma yöntemi kullanılmadan Marmara Denizi derinine deşarj edilmesi zaten kirletici baskısı altında ve kapalı bir sistem olan Marmara Denizi'nin kirlilik yükünü artıracaktır.
- Kirletici kaynaklarının deşarj noktalarının ve salınan yük değerlerinin hassas ve gerçekçi olarak belirlenmesi, nehir-içi kirletici konsantrasyonlarının tahmininde ve Ergene Derin Deniz Deşarjı gibi büyük projelerin olası çıktılarının değerlendirilmesinde kritik önem taşımaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Ergene Nehri'ne özgü hidrolik ve kirletici taşınım modelleri geliştirilmiştir. Modellenen kirletici hekza(metoksimetil)melamin (HMMM) organik kirleticisidir. Kararlı durum modelleri ölçüm anlarının benzeşimini yapmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Kasım 2017 Hidrolik Modeli ve Şubat 2018 Hidrolik Modeli ile bu modellerin altyapı oluşturduğu Kasım 2017 Taşınım Modeli ve Şubat 2018 Taşınım Modeli kararlı durum modelleridir. Ayrıca, Ergene Nehri'nin uzun dönemli benzeşimini yapmak amacıyla dinamik modeller oluşturulmuştur. İlk olarak Ergene Havzası'nın tamamını kapsayan ve 1997-2002 su yılları için kalibre edilmiş 71 Alt-havzalı Hidrolik Model ve bu modelin altyapısı üzerinde 71 Alt-havzalı Taşınım Modeli geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra 2015 su yılı için kalibre edilmiş Nokta34 Hidrolik Modeli ve bu modelin altyapısı üzerinde Nokta34 Taşınım Model'i geliştirilmiştir. Nokta34 Hidrolik Modeli geliştirilirken en güncel hidrolojik verilerin kullanılmasının yanında bölgedeki büyük endüstriler tarafından Ergene Nehri'ne yapılan önemli atıksu deşarjları da hesaba katılmıştır. Geliştirilen modellerin korelasyon ve NSE değerlerine bakıldığında modellerin nehirdeki hidrolik durumu ve su kalitesini yeterli düzeyde yansıttığı görülmektedir.

Çalışmanın son aşamasında bir model uygulaması gerçekleştirilerek planlanan Ergene Derin Deniz Deşarjı projesinin nehir su kalitesine (HMMM kirleticisi özelinde) olası etkileri incelenmek istenmiştir. Bu uygulamada, en güncel hidrolojik veriler kullanılarak ve önemli atıksu deşarjları hesaba katılarak oluşturulan Nokta34 hidrolik ve taşınım modelleri kullanılmıştır. Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi ile Ergene Nehri'nin kirlilik yükünü azaltmak amacıyla Ergene ve Çorlu Dereleri'ndeki organize sanayi bölgelerine (OSB) ait atıksu arıtma tesisi deşarj sularının inşa edilecek bir atıksu taşıma hattı ile Marmara Denizi derinine deşarj edilmesi planlanmaktadır. Projenin gerçekleştirilmesinin ardından Çorlu Deresi ve Ergene Nehri anakolunun üst kısımlarında olmak üzere iki önemli kaynağı olduğu tespit edilen HMMM kirleticisinin Çorlu Deresi üzerindeki kaynağı atıksu hattına verilecektir. Model benzeşimleri sonucu Ergene Derin Deniz Deşarjı projesi sonrası

Ergene Deresi ve Çorlu Deresi'nde kirletici konsantrasyonlarının büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Nehir-içi akımlarının çok azaldığı kurak yaz dönemlerinde ise Ergene Nehri ana kolunun üst kısımlarında yüksek konsantrasyonlar görülmeye devam etmektedir. Bu sonuçlardan hareketle HMMM kirleticisinin Ergene Nehri anakolunun üst kısımlarında kalan kaynağının da bu projeye dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca HMMM biyolojik bozunuma uğramayan ve geleneksel yöntemlerle artılamayan bir kirletici olduğundan, bu gibi kirleticilerin uygun arıtma yöntemi kullanılmadan Marmara Denizi derinine deşarj edilmesi zaten kirletici baskısı altında ve kapalı bir sistem olan Marmara Denizi'nin kirlilik yükünü artıracaktır. Bu gibi kirleticiler alıcı ortama deşarj edilmeden önce uygun ileri arıtım yöntemleri kullanılarak arıtılmalıdır.

Bu tez çalışmasında 115Y064 numaralı proje kapsamında ölçülen kirleticileri modelleyebilecek genel bir nehir-içi kirletici taşınım modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen modellerde izleyici (tracer) kimyasal olarak kullanılan hekza(metoksimetil)melamin (HMMM) yine 115Y064 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilen ölçümlerde hemen her ölçüm noktasında rastlanan ve Ergene Nehri'ne özgü kirletici kaynakları için parmak izi kirleticisi olarak belirlenen bir organik kirleticidir. HMMM düşük Log K_{ow} değerine (1.61) sahip olduğundan yüksek oranda suda bulunması beklenen bir kirleticidir. Henry Kanunu Sabiti 1.14E-010 (25 °C) olan ve düşük buhar basıncına (1.06E-008 mm Hg, 25 °C) sahip HMMM'in uçucu olması beklenmemektedir (URL-10; Dsikowitzky ve Schwarzbauer, 2015). Ancak sediment ortamında da bulunması muhtemeldir. HMMM kirleticisinin nehir suyuna deşarjının önlenmesinin ardından nehir dip sedimentleri ikincil bir kirletici kaynağı olarak davranabilir. Bu tip kimyasallar için çok ortamlı çevresel modellerin geliştirilmesi kimyasalların havzadaki akıbeti konusunda daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyacaktır.

Saha ölçümleri sonucu elde edilen akım ve konsantrasyon verileri modellerde doğrudan kullanılmamıştır. Bunun yerine, ölçüm hatalarından ve kısa süreli varyasyonlardan arındırılmaları amacıyla nehre farklı noktalardan akım ve kirletici girdilerinin belirlenmesi bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Optimizasyon probleminin çözümü için Mekânsal Takip Şemaları geliştirilmiş ve optimizasyon probleminin çözümü için Microsoft Excel 2010 yazılımının Çözücü

Eklentisi (Solver Add-in) kullanılmıştır. Bu sayede saha ölçümleri sonucu elde edilen veriler model girdisi olarak kullanılabilir hale getirilmiştir. Geliştirilen Mekânsal Takip Şemaları ve optimizasyon uygulaması saha ölçümlerindeki hataların ve süreksizliğin giderilmesi için kolay ve oldukça uygulanabilir bir yöntem olarak tarafımızdan önerilmektedir.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde bu tip modellerin geliştirilmesinde karşılaşılan zorluklardan en önemlisi Avrupa ülkeleri ve A.B.D. gibi ülkelerde çevrim içi ve ücretsiz şekilde erişilebilen verilere ulaşmaktır. Bu zorluk kısa sürede geliştirilip kalibre edilebilecek modellerin geliştirillme sürecini uzatmakta ve güçleştirmektedir. Doğru ve güvenilir verilere erişimin kolaylaştırılması bu modellerin doğruluğunun ve kullanımının artırılmasında olumlu etki yapacaktır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, nehir-içi kirletici konsantrasyonlarının tahmininde ve Ergene Derin Deniz Deşarjı gibi büyük projelerin olası çıktılarının değerlendirilmesinde bütünleşik hidrolojik, hidrolik ve kirletici taşınım modellerinin geliştirilmesinin önemini göstererek Türkiye'de havza yönetimi çalışmalarına katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

Ambrose R. B., Wool T. A., Barnwell T. O., Development of Water Quality Modeling in the United States, *Environmental Engineering Research*, 2009, **14**(4), 200-210

Bicknell B. R., Imhoff J. C., Kittle J. L., Donigian A. S., Johanson R. C., Hydrological Simulation Program--Fortran: User's manual for version 11, *U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory*, 10-211, 1997.

Chanson H., *Environmental Hydraulics For Open Channel Flows*, 1st ed, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004.

Chaudhry M. H., *Open-Channel Flow*, 2nd ed., Springer Science+Business Media, New York, 2008.

Chow V. T., *Open-Channel Hydraulics*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1959.

Cunge J. A., Holly F. M., Verwey A., *Practical aspects of computational river hydraulics*, Pitman Advanced Publishing Program, London, 1980.

Dsikowitzky L., Schwarzbauer J., Hexa(methoxymethyl)melamine: An Emerging Contaminant in German Rivers, *Water Environment Research*, 2015, **87**(5), 461-469

EKOTON, Ergene Havzasında Akım Ölçümü Ve En Kesit Profili Çıkarılması *Ekoton Çevre Ve Tarım Mühendislik Tic Ve San. Ltd. Şti*., 1.Dönem Raporu, 1-78, 2017.

EKOTON, Ergene Havzasında Akım Ölçümü Ve En Kesit Profili Çıkarılması *Ekoton Çevre Ve Tarım Mühendislik Tic Ve San. Ltd. Şti*., 2.Dönem Raporu, 1-79, 2018.

Fair G. M., The Dissolved Oxygen Sag-An Analysis, *Sewage Works Journal*, 1939, **11**(3), 445-461

Foley S. F., Gronenborn D., Andreae M. O., Kadereit J. W., Esper J., Scholz D., , The Palaeoanthropocene – The beginnings of anthropogenic environmental change, *Anthropocene*, 2013, **3**(83-88)

French R. H., *Open-Channel Hydraulics*, International Ed., McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1986.

Henderson F. M., *Open Channel Flow*, 1st Ed., Macmillan Publishing, New York, 1966.

Im S., Brannan K. M., Mostaghimi S., Cho J., Simulating Fecal Coliform Bacteria Loading from an Urbanizing Watershed, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2004, **39**(3), 663-679

Kargı P. G., Ergene Havzası Yağış – Akış İlişkilerinin Hidrolojik Ve Hidrolik Modelleme İle Belirlenmesi, Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Denizli, 2019.

Matin J. L., Wool T., Olson R., A dynamic one-dimensional model of hydrodynamics and water quality EPD-RIV1 Version 1.0. User's manual, *Georgia Environmental Protection Division*, Version 1.0, 5-10, 2002.

McBride G. B., Rutherford C., Accurate Modeling of River Pollutant Transport, *Journal of Environmental Engineering*, 1984, **110**(4), 1984

Mihelcic J. R., *Fundamentals of Environmental Engineering*, 1st Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 1999.

Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Williams J. R., Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, *Texas Water Resources Institute*, No. 406, 2011.

Öziş Ü., *Su Yapıları*, 1. Basım, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, İzmir, 1983.

Park R. A., Clough J. S., Wellman M. C., AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems, *Ecological Modelling*, 2008, **213**(1), 1-15

Pelletier G. J., Chapra S. C., Tao H., QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration, *Environmental Modelling and Software*, 2006, **21**(3), 419-425

Pham H. T., Marshall L., Johnson F., Sharma A., A Method for Combining SRTM DEM and ASTER GDEM2 to Improve Topography Estimation in Regions Without Reference Data, *Remote Sensing of Environment*, 2018, **210**(1), 229-241

Pistocchi A., *GIS Based Chemical Fate Modeling*, 1st Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2014.

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., *Numerical Recipes in C*, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 1992.

Rossman L. A., Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, *Environmental Protection Agency*, (EPA-600/R-14/413b), 1-190, 2015.

Saleh A., Du B., Evaluatıon Of Swat And Hspf Wıthın Basıns Program For The Upper North Bosque Rıver Watershed In Central Texas, *American Society of Agricultural Engineers*, 2004, **47**(4), 1039-1049

Smith G. D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*, 3rd ed., Clarendon Press, New York, 1985.

Srivastava K. W. M. P., Hydrologic Components of Watershed-Scale Models, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, **50**(5), 1695-1703

Streeter W. H., Phelps E. B., A study of the pollution and natural purification of the ohio river, 111. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration., *US Public Health Service*, 75, 1925.

Strum T. W., *Open Channel Hydraulics*, Internationa Edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 2001.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ergene Havzası Su Kalitesi İzleme Raporu İlkbahar ve Yaz Dönemi, *Çevresel Etki Değerlendirme İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü Laboratuvar Ölçüm Ve İzleme Dariesi Başkanlığı*, Final Raporu, 16, 2015.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı., Meriç-Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, *Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü*, Final Raporu, 213, 2008.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı., Meriç-Ergene Havzası Endüstriyel Atıksu Yönetimi Ana Plan Çalışması, *Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü Laboratuvar Ölçüm ve İzleme Dairesi Başkanlığı*, 222, 2010.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı., Atıksu Arıtımı Eylem Planı (2014-2023), *Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü*, Final Raporu, 2014.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı., Evsel ve Endüstriyel Kirlilik İzleme Programı 2015 Yılı İzleme Raporu, *Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü Laboratuvar Ölçüm ve İzleme Dairesi Başkanlığı*, 5-162, 2016.

Telci I. T., Optimal Water Quality Management In Surface Water Systems And Energy Recovery In Water Distribution Networks, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, Atlanta, 2012.

Tezel U., Ayvaz M. T., Balcıoğlu I., Gölge M., Göktaş R. K., Hanedar A., Erdoğan E. K., Sandıkkaya M. T., Tezel B. K., Ergene Havzası Su Kalitesi Yönetimi İçin Kirletici Parmak İzine Bağlı Coğrafi Bilgi Sistemi Bazlı Karar Destek Sistemleri Geliştirilmesi, Proje no: 115Y064, *TÜBİTAK*, Final Raporu, 2019.

Theriault E. J., The Dissolved Oxygen Demand of Polluted Waters, *Public Health Service*, 75, 1927.

Thomann R. V., Mathematical Model for Dissolved Oxygen, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 1963, **89**(5), 1-32

Thomann R. V., Muller J. A., *Principles of surface water quality modeling and control*, 1st Ed., Harper & Row, New York, 1987.

Türkiye Barolar Birliği., Ergene Derin Deniz Deşarjı Projesi ve Marmara Denizi, *Türkiye Barolar Birliği*, Ortak İnceleme Raporu, 44, 2015.

URL-1:http://ergene.ormansu.gov.tr/ergene2/AnaSayfa/Nufusu.aspx?sflang=tr, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2018).

URL-2:https://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eudem/eu-dem-v1.1, (Ziyaret tarihi: 3 Haziran 2017).

URL-3:http://www.ekoton.com.tr/tr/Ekoton/84/RiverRay-ADCP, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2018).

URL-4:https://www.aquaveo.com/downloads-wms, (Ziyaret tarihi: 17 Aralık 2018).

URL-5:https://www.epa.gov/ceam/better-assessment-science-integrating-point-and-non-point-sources-basins, (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2018).

URL-7:https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/,(Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

URL-8:https://ecology.wa.gov/Research-Data/Dataresources/Modelspreadsheets /Modeling-the-environment/Models-tools-for-TMDLs, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).

URL-9:http://fency.boun.edu.tr/FEnCY/FEnCY.html, (Ziyaret tarihi: 1 Haziran 2019).

URL-10:https://www.epa.gov/tsca-screening-tools/epi-suitetm-estimation-program-interface, (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2019).

Zalasiewicz J., Waters C. N., Williams M., Barnosky A. D., Cearreta A., Crutzen P., When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal, *Quaternary International*, 2015, **383**(196-203)

EKLER

Ek-1

Kanal Üst Genişlikleri (m)

Ölçüm noktası	Kasım 2017	Şubat 2018
3	44.26	222.58
4	10.32	11.27
5	13.86	13.52
16	7.46	27.39
27	11.68	15.13
28	27.92	27.67
29	22.58	24.58
30	25.47	41.94
31	28.36	34.58
32	14.34	25.53
33	15.39	36.69
34	29.14	40.88
35	30.63	37.19
36	24.66	43.43
37	35.30	58.53
38	32.87	41.24
39	63.15	63.15
40	48.28	55.02
42	16.57	31.11
43	18.57	43.05
46	22.44	25.87
48	3.89	6.04
49	4.17	3.98
50	2.09	2.70
52	9.43	20.49
53	20.34	44.36
54	6.57	8.33
55	2.91	2.89
56	8.06	10.39
60	3.64	26.87
62	9.89	22.84
63	4.08	2.38
64	9.33	9.82
70	--	2.50
71	14.11	18.19
72	39.66	221.36
75	6.28	14.28

Ek-2

NUMUNE ALIM NOKTALARINDA HİDROMORFOLOJİK DURUM GÖZLEM FORMU

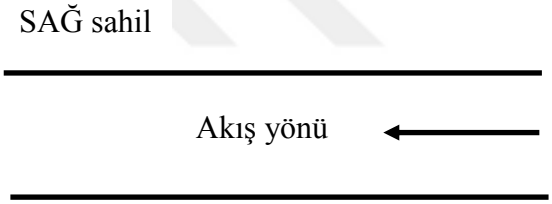
NUMUNE NOKTASI NO:

GÖZLEM TARİHİ:

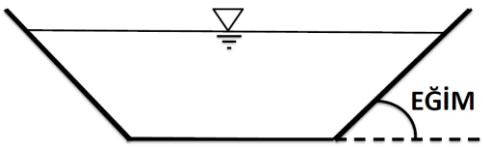
GÖZLEM SAATİ:

1. En-kesite ait morfolojik durum	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim
a. Doğal kanal			
b. İnsan yapımı kanal			
c. Taşkın Seddesi			

2. Sağ Sahil Eğimi	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim
a. 20°'den küçük			
b. 20° - 45° arası			
c. 45° - 75° arası			
d. 75°'den büyük			



3. Sol Sahil Eğimi	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim
a. 20°'den küçük			
b. 20° - 45° arası			
c. 45° - 75° arası			
d. 75°'den büyük			



4. En-kesitteki akış değerlendirmesi

Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Kuru

b. Az

c. Normal

d. Normal Üstü

e. Taşkın

5. En-kesitteki akış tipi

Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Çok şiddetli (taşkın)

b. Çok hızlı

c. Hızlı

d. Yavaş

e. Parçalı akış

f. Göllenmiş su

6. (Numune alım noktası etrafında) kanalın içerdiği malzeme

Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Toprak

b. Kaya

c. Kum

d. Çakıl

e. Beton

7. (Numune alım noktası etrafında) kanal yüzeyinin pürüzsüzlüğü	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Pürüzsüz (Kanalı kaplayan malzeme için elde edilebilecek en iyi yüzey)

b. Önemsiz (Düz kanal ama kenar şevleri biraz aşınmış)

c. Orta (Kenar şevleri orta seviyede aşınmış)

d. Şiddetli (Bozuk şekil veya düzensiz kazılmış kanal)

8. (Numune alım noktası etrafında) kanalda mevcut engellerin (örn. tümsekler, kütükler, kayalar, köprü ayakları) su akışına görünen etkisi	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. İhmal edilebilir

b. Önemsiz

c. Kayda değer

d. Şiddetli

9. (Numune alım noktası etrafında) kanal içindeki bitki örtüsü	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Yok

b. Yosun ve yabani otlar

c. Ağaç fideleri, köklü otlar

d. Hafif çalılık

e. Genç, yapraksız ağaçlar

f. Yapraklı ağaçlar, çalılar

10. (Numune alım noktası etrafında) kanaldaki su derinliği ile içindeki bitki örtüsünün yüksekliğinin karşılaştırılması	Eminim	Kısmen eminim	Hiç emin değilim

a. Bitki örtüsü yok

b. Su derinliği bitki örtüsü yüksekliğinden düşük (bitkiler su seviyesinin üstünde kalıyor)

c. Su derinliği ile bitki örtüsü yüksekliği eşit

d. Su derinliği bitki örtüsü yüksekliğinin 1-2 katı (bitkiler suyun altında)

e. Su derinliği bitki örtüsü yüksekliğinin 2-3 katı (bitkiler suyun altında)

f. Su derinliği bitki örtüsü yüksekliğinin 3-4 katı ya da daha fazla (bitkiler suyun altında)

11. GEREKLİ GÖRÜLEN AÇIKLAMALAR ve ÖNEMLİ HUSUSLAR

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Goktas R.K., Tezel U., Ayvaz T., Kargı P.G., Kentel E., Mesta B., and **Tezyapar I.** (2017). "Effect of Extreme Years in Hydrological Model Calibration Performance." *AGU 2017 Fall Meeting*, 11–15 December 2017, New Orleans, Louisiana.

Goktas R.K., Ayvaz T., Kargı P.G., Kentel E., Mesta B., **Tezyapar I.**, and Tezel U., (2018). "Effect of Land Surface Elevation Data Availability on River Hydraulic Model." *EGU General Assembly 2018*, 8–13 April 2018, Vienna, Austria.

Tezyapar İ., Ayvaz T., Göktas R.K., Kargı P.G., Kentel E., Mesta B. and Tezel U., (2018). "Nehir Suyu Kalitesi Gözlem Sonuçlarının Hidrolik ve Taşınım Modelleri Yardımıyla İncelenmesi" *Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu (UKSAY)-2018*, 25–27 Ekim 2018, Pamukkale, Denizli.

Kentel E., Ayvaz T., Göktas R.K., Kargı P.G., Mesta B., **Tezyapar İ.** and Tezel U., (2018). "Yenigörüce Havzası'ndaki Yağış-Akış İlişkisinin HEC-HMS Hidrolojik Modeli ile Belirlenmesi." *Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu (UKSAY)-2018*, 25–27 Ekim 2018, Pamukkale, Denizli.

ÖZGEÇMİŞ

1994 yılında Bursa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'ın Yıldırım İlçesinde, Lise öğrenimini Gürsu İMKB Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği bölümünden 2016 yılda mezun oldu. 2016 eğitim-öğretim yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, Yüksek Lisans öğrenimine başladı.