T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARAR DESTEK MODELİ İLE FOSFOR KİRLİLİĞİNİN İNCELENMESİ - PORSUK HAVZASI ÖRNEĞİ

MELTEM ÇELEN
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARAR DESTEK MODELİ İLE FOSFOR KİRLİLİĞİNİN İNCELENMESİ - PORSUK HAVZASI ÖRNEĞİ

MELTEM ÇELEN
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MEHMET KARPUZCU
II. DANIŞMANI
PROF. DR. GÜLEDA ENGİN

GEBZE
2014

GEBZE YÜKSEKTEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	**DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU**

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/06/2014 tarih ve 2014/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/07/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Meltem ÇELEN'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Prof. Dr. Mehmet KARPUZCU

ÜYE
(II. TEZ DANIŞMANI):Prof. Dr. Güleda ENGİN

ÜYE :Prof. Dr. Ayşegül TANIK

ÜYE :Doç Dr. Nihal BEKTAŞ

ÜYE :Doç Dr. Salim ÖNCEL

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Su havzalarının yönetiminde veri temini en zor aşama olmakla birlikte veri yığınlarının değerlendirilmesi ve bunlara dayalı karar üretilmesi de zaman alan bir süreçtir. Son yıllarda karar destek sistemlerinin bu alandaki kullanımının hızlı sonuçlar elde etme açısından faydalı olduğu görülmüştür.

Fosfor kirliliğinin, ötrofikasyona sebebiyet vermesi nedeniyle kontrol altında bulundurulması önemlidir. Bu amaçla Alamanya'da geliştirilen MEPhos (Model for the Estimation of Phosphorus inputs to rivers from diffuse and point sources) birçok uygulaması bulunan bir karar destek modeldir. Modelin Tükiye'de Porsuk baraj havzasında fosfor kirliliği kontrolüne yönelik uygulaması yapılmıştır. Bölgenin şartlarını daha iyi yansıtmasını sağlamak amacıyla, toprakta ve foseptiklerde toplam fosfor (TF) parametresi tespit çalışmalarıyla kullanılan katsayılar modifiye edilmiştir. Evsel ve endüstriyel kaynakların yanı sıra yeraltı suyu deşarjından kaynaklı TF yükleri ve tarım alanlarındaki toprak taşınımı ile meydana gelen TF kirliliği, 2007-2011 yılları arasındaki durum baz alınarak modellenmiştir. Tarım alanlarındaki TF yüklerinin modellenmesi CORINE arazi kullanım haritasındaki sınıflandırmalara göre, sulamalı ve kuru tarım alanları için ayrı ayrı yapılmıştır. Buna göre havzadaki TF yüklerinin yaklaşık % 57'sine noktasal kaynaklar, % 40'ına tarım alanlarındaki toprak taşınımı ve % 3'lük orana ise yeraltı suyu deşarjı sebep olmaktadır. Tarım alanlarındaki TF yüklerinin birim yıllık ortalama değeri 0,1 t/ha.yıl'dır.

Mevcut durumun ortaya konulmasının ardından göldeki ötrofikasyonla mücadeleye yönelik olarak senaryo analizleri yapılmıştır. Gölün kritik fosfor yükü değeri 7,9 t/yıl olarak hesaplanmış ve bu değerin modelle belirlenen yükten (yaklaşık 46 t/yıl) oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Senaryolar neticesinde noktasal kaynaklarda alınabilecek önlemlerle toplam TF yükünde önemli bir azalmasının sağlanamayacağı görülmüştür. Bununla birlikte tarım yapılan ve 15 t/ha.yıl' dan daha fazla toprak kaybına neden olan alanlarda alınacak önlemlerin baraj gölüne gelen TF yüklerinde yaklaşık % 40 azalmayı sağlayacağı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karar Destek Modeli; Fosfor Kirliliği; Yayılı Kirletici Kaynaklar; Senaryo Analizleri.

SUMMARY

Although data acquisition is the most difficult stage, to evaluate data stacks and, based on these data, to produce decisions is also a time consuming process in watershed management. In recent years, the use of decision support systems in this area to achieve rapid results has been shown to be useful.

It is important to keep phosphorus pollution causing eutrophication in surface waters under control. The MEPhos model (Model for the Estimation of Phosphorus inputs to rivers from diffuse and point sources), a decision support model developed in Germany for this purpose has found many application areas. This model has been applied in Porsuk reservoir catchment in Turkey for phosphorus pollution control. In order to better reflect the conditions of the region, the coefficients used in the modelling were modified by determining the total phosphorus (TP) in the soil and cesspits. The TP loads from domestic and industrial sources as well as from the groundwater discharge and from the soil loss occurred in agricultural land modelled on the basis of the situation between the years of 2007-2011. Modeling the TP loads arise from agricultural areas were carried out separately for irrigated and dry farming areas based on CORINE land use map. Accordingly almost 57 % of TP loads originate from point sources in the basin. The TP load from agricultural soil loss is about 40 %. Groundwater discharge has a proportion of 3 % in total TP loads. The mean annual unit value of TP loads for agricultural areas is 0.1 t / ha.a.

Following the introduction of the current situation, scenario analyses were performed to combat eutrophication in the reservoir. The critical phosphorus load value for the reservoir was calculated to be 7.9 t/a and it has been found to be quite high from the value (about 46 t/yıl) determined by modelling. However, it should be noted that measures that should be taken in the regions having a soil loss further than 15 t/ha.a in agricultural areas, would provide a 40% reduction in TP loads.

Keywords: Decision Support Model; Phosphorus Pollution; Diffuse Pollution Sources; Scenario Analysis.

TEŞEKKÜR

Tez çalışması TÜBİTAK ile Helmholtz Alman Araştırma Merkezi Topluluğu tarafından verilen burs ile desteklenmiştir, teşekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet Karpuzcu'ya bu konuda çalışmamı teşvik etmesi ve her aşamadaki fikirleriyle tez içeriğinin zenginleşmesindeki yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Yardımcı danışmanım Prof. Dr. Güleda Engin'e gerek manevi desteği, gerekse bilimsel desteğini esirgememesi ve kritik problemlerimin çözümünde sağladığı çok önemli katkılar için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Jüri üyeleri Prof Dr. Anatoli Dimoglo' ya ve Prof. Dr. Ayşegül Tanık'a değerli yönlendirmeleri; Doç Dr. Nihal Bektaş'a çalışmalarımın kolaylıkla ilerlemesindeki yardımları için teşekkürlerimi sunarım. Tezin Almanya'da yürütülen bölümündeki teknik ve bilimsel desteği için Dr. Björn Tetzlaff'a ve Dr. Frank Wendland'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Arazi ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımları ve önerileri için Doç. Dr. Salim Öncel'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca başta Bölüm Başkanımız. Prof. Dr. Bülent Keskinler olmak üzere bölümümün diğer değerli hocaları ile mesai arkadaşlarıma destekleri için teşekkür ederim

Çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan Annem Kamuran Koçal ve Babam Taşkın Koçal'a, maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim. Eşim Mustafa Haydar Çelen'e gösterdiği anlayış ve destek için teşekkür ederim. Kızlarım Bilge Su Çelen ve Aybüke Su Çelen'e sabırları ve tüm zorlukları unutturdukları için teşekkür ederim. Ayrıca kardeşlerim Çiğdem Koçal ve Yasin Koçal'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Motivasyon	4
2. FOSFOR KİRLİLİĞİNİN SU KALİTESİNDEKİ ÖNEMİ	6
2.1. Fosforun Önemi	6
2.2. Fosforun Ötrofikasyona Etkileri	9
2.3. Ötrofikasyonun Zararları	11
3. HAVZA BAZLI MATEMATİK MODELLER	14
3.1. Türkiye'de Modelleme Araçlarının Kullanımı	16
4. MEPhos MODELİ ve ÇALIŞMA ALANINA UYARLANMASI	18
4.1. Erozyon Kaynaklı TF yüklerinin belirlenmesi	20
4.1.1. Zenginleştirme Oranının (Enrichment Ratio- ER) belirlenmesi	21
4.1.2. Yeraltı Suyundan Kaynaklanan TF Yükünün Hesabı	22
4.1.3. Evsel ve Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesislerinden Gelen TF Yükü Hesabı	27
4.2. MEPhos' un Türkiye Şartlarına Uyarlanması	28
4.2.1. Foseptiklerden Gelen Yüklerin Hesabı ve Model Katsayılarının Belirlenmesi	29
4.2.2. Üst Toprak TF İçeriğinin Belirlenmesi	30
4.3. Model İçin Gerekli Veriler	33
5. MODELİN UYGULANMASI	36
5.1. Porsuk Havzası	36

5.1.1. Havzanın Konumu ve Özellikleri 38
5.1.2. Topografya 40
5.1.3. Arazi Kullanımı 40
5.1.4. Toprak Özellikleri 41
5.2. Verilerin Model için Analiz Edilmesi ve Model Uygulama 42
5.2.1. Endüstriyel Kirletici Kaynaklar 42
5.2.2. Kütahya Atıksu Arıtma Tesisi 44
5.2.3. Foseptikler 45
5.2.4. Yeraltısuyu Deşarjı 46
5.2.5. Tarım Alanlarından Kaynaklanan Toprak Taşınımı 48
5.2.5.1. TF Taşıma Bölgelerinin Tayin Edilmesi 50
5.2.5.2. TF Değerlerinin Haritalandırılması 51
5.2.5.3. Erozyonla Taşınan TF Tayin Edilmesi 52
5.2.5.4. Akarsularda Meydana Gelen TF Çökelme Değerlerinin Hesaplanması 53
5.3. Model Validasyonu 53
6. SONUÇLAR 56
6.1. Endüstriyel TF Yükleri 57
6.2. Evsel TF Yükleri 58
6.2.1. Kokarçay Alt Havzası 59
6.2.2. Kureyşler Deresi Alt Havzası 60
6.2.3. Meyşir Deresi Alt Havzası 60
6.2.4. Avşar Deresi Alt Havzası 61
6.2.5. Murat Çayı Alt Havzası 62
6.2.6. Porsuk Deresi Alt Havzası 62
6.2.7. Ağaçköy Alt Havzası 63
6.2.8. Candıraz Deresi Alt Havzası 64
6.2.9. Avlupınar Deresi Alt Havzası 64
6.2.10. Felent Çayı Alt Havzası 65
6.2.11. Güvez Deresi Alt Havzası 66
6.2.12. Kunduzlu Deresi Alt Havzası 67
6.3. Yeraltısuyu Deşarjı 67
6.4. Tarım Alanlarından Kaynaklanan Toprak Taşınımı 68
6.4.1. Kokarçay Alt Havzası 69

6.4.2. Kureyşler Deresi Alt Havzası 70
6.4.3. Meyşir Deresi Alt Havzası 70
6.4.4. Avşar Deresi Alt Havzası 71
6.4.5. Murat Çayı Alt Havzası 72
6.4.6. Porsuk Deresi Alt Havzası 72
6.4.7. Ağaçköy Alt Havzası 73
6.4.8. Candıraz Deresi Alt Havzası 74
6.4.9. Avlupınar Deresi Alt Havzası 74
6.4.10. Felent Çayı Alt Havzası 75
6.4.11. Güvez Deresi Alt Havzası 76
6.4.12. Kunduzlu Deresi Alt Havzası 77
7. SENARYO ANALİZLERİ 79
7.1. Evsel ve Endüstriyel Kaynaklara Yönelik Analizler 79
7.2. Tarım Alanlarından Toprak Taşınımına Yönelik Analizler 80
7.3. Senaryo Sonuçlarının Değerlendirilmesi 82
8. DEĞERLENDİRME 84

KAYNAKLAR 87
ÖZGEÇMİŞ 94
EKLER 95

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		Açıklamalar
ha	:	Hektar
kg	:	Kilogram
km	:	Kilometre
l	:	Litre
mg	:	Miligram
mm	:	Milimetre
N	:	Azot
P	:	Fosfor
PO_4-P	:	Fosfat fosforu
Orto-P	:	Orto – fosfor
sn	:	Saniye
t	:	Ton
AB	:	Avrupa Birliği
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
ATP	:	Adenozintrifosfat
AAT	:	Atıksu Arıtma Tesisi
CBS	:	Coğrafi Bilgi Sistemleri
MEPhos	:	Model for the Estimation of Phosphorus inputs to rivers from diffuse and point sources
TF	:	Toplam Fosfor

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Doğada fosfor döngüsü.	8
2.2:	Toprakta fosfor döngüsü.	8
4.1:	Kritik askıda katı madde yükü belirleme grafiği.	22
4.2:	Konsolide kayaçların bulunduğu alanlarda bileşeninin yeraltısuyu deşarjından ayrılması (MoMLRr- metodu).	25
4.3:	GROWA modelinde yeraltısuyu beslemesini belirleyen karakteristikler.	26
4.4:	Toprak numunesi alma çalışmaları, a) Mera alanı b) Sebze bahçesi	31
4.5:	MEPhos modelinin akış şeması.	33
4.6:	MEPhos modeli uygulama aşamaları.	35
5.1:	Çalışma Alanının Konumu.	39
5.2:	Porsuk baraj havzası topografya haritası.	40
5.3:	Porsuk havzası arazi kullanım gruplarının dağılımı.	41
5.4:	Porsuk havzası toprak grupları.	42
5.5:	Kütahya atıksu arıtma tesisi TF konsantrasyonu değişim grafiği.	45
5.6:	Foseptiklerde ölçülen TF konsantrasyonları ve bağlı yerleşimlerdeki nüfuslar.	46
5.7:	Porsuk baraj gölü havzası yıllık ortalama yeraltı suyu deşarjı haritası.	47
5.8:	Yeraltısuyundan kaynaklı TF yükü hesabında kullanılan verilerin veri tabanındaki görüntüsü.	48
5.9:	Porsuk baraj gölü havzası erozyon haritası	49
5.10:	SAGA programı nehir ağı oluşturma analizi.	50
5.11:	Porsuk havzası toprak numunesi alanları.	51
5.12:	Ağaçköy havzası kritik debi ve AKM yükü belirleme grafiği.	52
5.13:	MEPhos model validasyon grafiği.	54
6.1:	Porsuk baraj havzasındaki toplam yıllık ortalama yüklerin alt havzalara ve kirletici kaynaklara göre dağılımı.	56
6.2:	Havzadaki TF yüklerinin kirletici kaynak bazında dağılımı.	57
6.3:	Havzadaki endüstriyel kaynaklı TF yüklerinin kaynak bazında dağılımı.	58
6.4:	Kokarçay Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.	59
6.5:	Kureyşler Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.	60

6.6: Meyşir Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 61
6.7: Avşar Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 61
6.8: Murat Çayı Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 62
6.9: Porsuk Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 63
6.10: Ağaçköy Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 63
6.11: Candıraz Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 64
6.12: Avlupınar Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 65
6.13: Felent Çayı Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 66
6.14: Güvez Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 66
6.15: Kunduzlu Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri. 67
6.16: Yeraltısuyu deşarjı ile yüzeysel sulara taşınan TF yükü. 68
6.17: Kokarçay Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 69
6.18: Kureyşler Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 70
6.19: Meyşir Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 71
6.20: Avşar Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 71
6.21: Murat Çayı Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 72
6.22: Porsuk Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 73
6.23: Ağaçköy Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 73
6.24: Candıraz Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 74
6.25: Avlupınar Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 75
6.26: Felent Çayı Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 76
6.27: Güvez Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 77
6.28: Kunduzlu Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri. 78
7.1: Porsuk havzasında yüksek toprak kaybı (15 t/ha. yıl) riski olan bölgeler. 82

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	Göllerde N:P oranı olarak azot fosfor sınırlandırma seviyeleri.	10
4.1:	GROWA modelinin uygulaması için gerekli veri setleri.	23
4.2:	Foseptiklerde yapılan TF ölçüm sonuçları.	29
4.3:	Ölçülen TF konsantrasyonları ve ilgili arazi kullanımı özellikleri.	32
5.1:	MEPhos modelinin uygulanması için gerekli veriler.	37
5.2:	Havzada bulunan önemli sektörlerin tipik atıksu deşarlarında bulunabilecek TF konsantrasyonu değerleri.	43
5.3:	Porsuk havzasında bulunan bazı önemli endüstriler ve atıksu deşarj bilgileri.	43
5.4:	Su erozyonu için OECD indikatör değerleri.	49
5.5:	Validasyon için kullanılan veriler ve hesaplanan hata oranları.	55
7.1:	Toprak taşınımı dağılımı ve ilgili tarım alanı yüzdeleri.	81
7.2:	Model dönemi ile senaryo sonrası durum için TF yüklerinin karşılaştırılması.	83

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Bilindiği gibi Türkiye'de çevre kirliliğinin önlenmesine, insan sağlığının ve doğal kaynakların korunmasına yönelik olarak birçok yönetmelik ve kanun bulunmaktadır. İçme, kullanma ve endüstriyel sularla ilgili 1053 sayılı kanun, 167 sayılı yeraltı suları kanunu ve ilgili yönetmelikler, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, Çevredeki ve Su Ortamındaki Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Su Ürünleri Yönetmeliği ve İçme Suyu Temin Edilen Yüzeysel Suların Kalite Yönetmeliği bunlar arasında sayılabilir. Günümüzde Orman ve Su İşleri Bakanlığı ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, tüm bu kanun ve yönetmeliklerin adım adım Avrupa Birliği (AB) mevzuatına uygun olarak düzenlenmesi doğrultusunda çalışmalarını yürütmektedir.

AB Su Çerçeve Direktifinin ana amacı Avrupa'daki su kaynaklarının yönetiminin nehir havzaları bazında yürütülmesinin sağlanmasıdır. Bu direktifin en önemli hedefi 2015 yılı itibariyle nehir havzalarındaki su kaynaklarının iyi kalite ve miktar özelliklerine sahip olmasıdır. Bunun için su kaynaklarının yayılı ve noktasal kirleticilere karşı korunması ile aşırı kullanımın önlenmesi gerekmektedir. Bu direktifin uygulanması çeşitli adımlarda gerçekleştirilmektedir. Uygulama AB ülkelerinin 2004 yılına kadar su kaynaklarının durumlarını tespit etmeleri ile başlamıştır. Bu durum tespitinden sonra izleme programları hazırlanmış ve 2006 yılı itibari ile uygulamaya konulmuştur. Nehir havzalarının yönetim planlarının tamamlanma zorunluluğu ise 2009 yılında getirilmiştir. Son olarak da 2015 yılı itibari ile iyi bir su kalitesine sahip olunabilmesi için bu programların uygulamaya konması, değerlendirilmesi ve gerekli değişikliklerin yapılması şartı konulmuştur.

AB üyelik sürecinin bir gereği olarak, Türkiye su kaynaklarının kalite ve miktar özelliklerini iyileştirme ve koruma çalışmaları yürütmek durumundadır. Fakat Türkiye sadece Su Çerçeve Direktifinin bir yaptırımı olduğu için değil, aynı zamanda su zengini olmayan bir ülke olarak, su kaynaklarının gelecekte de sürdürülebilir kullanımı için su kaynaklarının, dolayısıyla da nehir havzalarının, yönetim planlarını oluşturması gerekmektedir. Türkiye'de su kaynaklarındaki önemli kalite problemlerinden biri azot ve fosfor gibi besi elementlerinin su

ortamında aşırı bulunmasının yol açtığı ötrofikasyondur. Bu problem noktasal ve yayılı kirleticilerden kaynaklanmaktadır. Azot (N) ve Fosfor (P)'un su içerisindeki aşırı miktarları yüzeysel sularda sucul bitkilerin ve alglerin çoğalmasına neden olmaktadır. Bu tür organizmaların çoğalması isale hatlarının tıkanmasına, biyolojik parçalanmaları sırasında suyun oksijeninin kullanımına ve güneş ışığının suyun alt tabakalarına inmesine engel olmaktadır. Özellikle içme suyu temini ve sulama amaçlı kullanım için barajlarda biriktirilen sular risk altındadır. Gerekli önlemlerin alınmaması durumunda hızlı nüfus artışı, şehirleşme ve endüstrileşme nedeniyle yakın gelecekte ötrofikasyonun sebep olduğu su kalitesi problemlerinin artacağı ön görülmektedir. Türkiye'de bulunan nehirlerdeki yüksek besi maddesi konsantrasyonları nedeniyle ötrofikasyon önemli problemdir. Türkiye yarı kurak iklim özelliğine sahip bir ülke olduğundan küresel ısınmadan kaynaklanacak risklerin etkilediği ülkelerden biri konumundadır. Atmosferde meydana gelecek olan ortalama sıcaklık artışı ötrofikasyona neden olan süreçleri hızlandıracağından kirleticilerin su kaynaklarına verilmesinde yürürlülükteki limit değerlere uyum daha da önemli olacağı tahmin edilmektedir.

Gerek su kalitesi ile ilgili problemlerin çözümü ve su kaynaklarının mevcut kalite seviyelerinin sürdürülebilmesi gerekse de gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye'nin sürdürülebilir su kullanımını devam ettirebilmesi için etkin bir su kalitesi yönetiminin havza bazlı geliştirilmesi yönünde çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmalar son zamanlarda araştırma kurumlarıyla ortaklaşa yürütülmeye başlanmıştır. Bu aşamada karar vericilere yardımcı olmak üzere, su kaynağının mevcut durumunu ortaya koyan ve su havzalarının çeşitli kullanımlarından dolayı değişen kirlilik yüklerinin etkisini analiz edebilen modelleme araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması ile bu yöndeki bir ihtiyacın karşılanmasına katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

Yukarıda bahsi geçen planlarının oluşturulmasında havza sistemlerini yansıtmaya yardımcı olan matematik modellerin kullanımı karar vericiler için önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Türkiye'de su kalitesinin modellenmesi nispeten daha uzun bir geçmişe sahipken su kaynaklarının havzalarıyla birlikte göz önünde bulundurarak yapılan modelleme çalışmaları son yıllarda başlamıştır. Çalışmalarda uygulanan model yazılımları genellikle hazır paket programlar olduğundan model içerisindeki katsayılar ve parametreleri değiştirmek çoğunlukla mümkün olmamaktadır.

Bu doktora çalışmasının genel amacı, yüzeysel sulardaki yayılı ve noktasal kirleticilerden kaynaklanan fosfor kirliliğine yönelik tahmin ve hesaplama olanağı sağlayan ve Türkiye'nin arazi kullanımı ve iklim koşullarına uygulanacak bir model prototipinin oluşturulmasıdır. Yapılan çalışmalarda fosforlu bileşiklerin ötrofikasyonu sınırlandıran en önemli besi elementi olduğu belirtilmektedir. Özellikle de fosfor giderimi yapılan atıksu deşarjları ve yayılı kaynaklardan gelen girdilere maruz kalan su kaynaklarında ötrofikasyonun fosfor tarafından sınırlandırıldığı kabul edilmektedir [Baker, 1996]. Bu nedenle su kaynaklarının kalitesinin korunması ve iyileştirilmesi amacıyla oluşturulacak yönetim planlarında fosfor kirliliğine yol açacak kirletici kaynaklarının göz önünde bulundurulması önemlidir. Modelin oluşturulmasında baz olarak alınacak olan MEPhos fosfor modeli Almanya'da nehir havzalarında su bütçesi ile su ve madde akışı konusundaki modellerin geliştirilmesine yönelik birçok araştırma projesi yürütmüş araştırmacılar tarafından geliştirilmiş bir modeldir [Guse et al., 2007], [Tetzlaff et al., 2007], [Tetzlaf and Wandland, 2012]. Modelin Türkiye'de AB Su Çerçeve Direktifi'ne uygun olarak su kaynaklarını korumaya yönelik değerlendirmelere destek olacak şekilde oluşturulması tezin en önemli gayelerinden biridir. Türkiye'deki sınırlı su kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, su kaynaklarının miktar ve kalite özelliklerine yönelik ihtiyaçların karşılanma stratejilerine katkıda bulunacak bu tarz modelleme araçlarına ihtiyaç vardır.

Tez çalışması kapsamında sularda izlenen fosfor parametrelerinden Toplam Fosfor (TF) parametresi üzerinde çalışılmıştır. Bunun sebebi MEPhos modelinde TF'un uzun vadede suda çözünebilen fosfat türlerine dönüşeceği kabulünü yapılmış olmasıdır.

Çalışma alanı, Sakarya ırmağının bir kolu olan Porsuk nehrinin üzerinde kurulu bulunan Porsuk baraj gölü havzası olarak belirlenmiştir. Porsuk baraj gölü, Kütahya'nın Tokul kasabasında doğan Porsuk deresi ve diğer yan kollarla beslenmekte ve Kütahya ile Eskişehir İlleri arasında yer almaktadır. Baraj gölü sulama, taşkın önleme ve içme – kullanma suyu temini amacıyla kurulmuş olup Kütahya ve Eskişehir İlleri'nin su ihtiyacını karşılamaktadır [ÇŞB, 2011]. Baraj havzası yaklaşık 5000 km^2'lik bir alanı kapsamaktadır. Havzada, Kütahya il merkezinin yanı sıra, 4 ilçe, 7 belde ve 206 köy yer almaktadır. Türkiye'nin önemli sanayi kuruluşlarından biri olan Seyitömer Termik Santrali'nin yanı sıra Kütahya Şeker fabrikası, Kütahya TÜGSAŞ Gübre fabrikası gibi tesisler havza içerisinde

yer almaktadır. Çevresel Bilgi Koordinasyonu Projesi (CORINE) 2006 verilerine göre havzanın yaklaşık 2650 km^2'lik bölümü tarım alanı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, Porsuk nehri aynı zamanda endüstriyel ve evsel atıksu deşarjları gibi noktasal ve tarım alanlarından dönen sulama suları ve yağış suları gibi önemli yayılı kirleticilerin alıcı ortamı olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple baraj gölünün su kalitesi önemli ölçüde etkilenmiş ve trofik seviyesi ötrofik düzeyi de aşmıştır.

Noktasal ve yayılı kirlilik kaynaklarının mevcut durumunun tespiti su kaynaklarının kirlilik önleme çalışmalarında ortaya konulması gereken en öncelikli adımdır. Havzada bulunan çeşitli arazi kullanımlarının ve dolayısıyla noktasal ve yayılı kaynaklarının mevcuttaki yıllık TF yüklerinin durumunun ortaya konması bu tez çalışmasının en önemli ve en uzun süre gerektiren bölümüdür. Bununla birlikte baraj gölü havzasının planlaması kapsamında üretilen çeşitli senaryolar karşısında yıllık TF yükünün nehir üzerindeki istasyonlardaki değişiminin ortaya konması amaçlanmıştır.

Tez kapsamında yürütülen çalışmalar ile ortaya konulan bulgular ikinci bölümden başlayarak takip eden bölümlerde sunulmuştur. Bölüm 2'de ve Bölüm 3'te ilgili literatür bilgisi verilmiştir. Ardından Bölüm 4'te MEPhos modeli tanıtımı yapılarak uygulama prensibi ve yapılan modifikasyonlar aktarılmıştır. Bölüm 5'te de çalışma bölgesinin tanıtımı yapılmış ve modelin uygulama aşamaları anlatılmıştır. Sonuçlar Bölüm 6'da, senaryo çalışmaları ise Bölüm 7'de verilmektedir. Son olarak Bölüm 8'de tez çalışması ile ilgili bir değerlendirme sunulmuştur.

1.2. Motivasyon

Tez çalışmasında kullanılacak olan MePhos modeli altyapısı Jülich Araştırma Merkezi'nde hazırlanmış olup noktasal ve yayılı türde 7 farklı kaynaktan oluşan yıllık TF emisyonunu hesaplamaktadır. Tez çalışması kapsamında MePhos modeli başta iklim şartları olmak üzere, kirletici kaynaklarının tür ve dağılımlarına (fosseptik uygulamaları vb.) ve arazi kullanım özelliklerine göre modifiye edilerek çalışma alanı olan Porsuk baraj havzasına özgün bir model oluşturulmuştur. Yeniden geliştirilen bu modelin, Türkiye'de özellikle yayılı kirletici kaynaklardan

gelen TF yükünün hesaplanması konusunda ihtiyaç duyulan modelleme aracı olarak önemli bir gereksinime kısmen de olsa cevap vereceği düşünülmektedir.

Türkiye'deki su kalitesi araştırmaları genellikle kirletici parametrelerin bir arada modellenmesi veya araştırılması şeklinde yürütülmüştür. Bununla birlikte bileşiklerin bir arada ele alınması, çalışmaların derinlemesine yürütülmesinde engel teşkil edebilmektedir. Bunun yanı sıra, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde su kalitesi çalışmalarında kullanılan verilerin üretilmesi ve üçüncü kişilerce temininde yaşanan güçlükler çalışmaların tek bir parametre üzerinden yürütülmesi bakımından sonuca ulaşmada kolaylık sağlayabilmektedir. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında su kaynaklarındaki besi maddesi kirliliğine ve dolayısıyla ötrofikasyon problemine yol açan TF parametresinin alınması uygun görülmüştür.

Porsuk Nehri'nin su kalitesi incelemesiyle ilgili çalışmalar 1980'li yıllardan itibaren başlamış ve bu konuda günümüze kadar gerek kamu kuruluşlarının gerek üniversitelerin yürüttüğü 10'dan fazla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle Porsuk Nehri'nin Sakarya Irmağı katılımına kadar olan bölümü kapsamaktadır. Bu sebeple de Porsuk Nehri'nin yan kollarının yeterince detaylı olarak incelenmediği tespit edilmiştir. Bu sebeple bu çalışmada Porsuk nehrinin baraja kadar olan bölümünü ve yan kollarını da içeren tüm havza çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu şekilde kirlilik yüklerinin modellenmesi alt havzalar bazında detaylandırılabilmiştir.

2. FOSFOR KİRLİLİĞİNİN SU KALİTESİNDEKİ ÖNEMİ

2.1. Fosforun Önemi

Fosfor elementi ilk kez 1669 yılında Alman bilim adamı Henning Brand tarafından keşfedilmiştir. Adı ile kayıt altına alınmış olarak keşfi yapılan ilk elementtir. Havayla temasında yanması sonucu karanlıkta ışık yayması sebebiyle yunanca "ışık getiren" ya da "ışık taşıyan" anlamındaki "fosfor" olarak adlandırılmıştır. Yarı saydam, balmumu kıvamında, karanlıkta ışıldayan sarımsak kokulu, zehirli bir elementtir. Doğada bulunan tek kararlı izotopu P31'dir. Bunun yanı sıra 6 radyoaktif izotopu daha vardır. Beyaz fosfor, kırmızı fosfor, mor fosfor, siyah fosfor olmak üzere 4 çeşit allotropik formu mevcuttur [Web 1, 2014]. Fosfor oksijene olan ilgisi sebebiyle doğada serbest olarak bulunmaz. Fosfor toprak örtüsünde ağırlık olarak % 0,2 yer kabuğunda yaklaşık olarak % 0,11 okyanuslarda ise 88 ppb düzeyinde bulunmaktadır [O'Neill, 1993]. Doğada temel olarak iki farklı fosfor kaynağı bulunmaktadır. Birincisi fosfat kayaçları diğeri ise su ve toprakta bulunan fosforun kullanılmasıyla canlı bünyesinde oluşturulan organik fosfordur. Amerika Birleşik Devletlerinin resmi kuruluşu olan Jeolojik Araştırmalar Merkezi (USGS) 'in 2013 yılında yayımladığı "Mineral Commodity Summaries" adlı raporuna göre fosfat minerali üretiminde Çin ilk sırada yer almaktadır [USGS, 2013]. Fosfor üretiminde Çin'i Amerika Birleşik Devletleri ve dünya fosfat rezervleri açısından en zengin ülke olan Fas izlemektedir.

Fosfor kimyası geleneksel organik kimya ve modern inorganik kimya alanında çok önemli bir yer edinememiş olmakla birlikte endüstri de büyük bir öneme sahiptir [Westheime, 1992]. Fosforun kullanıldığı en önemli sanayi dalını gübre sanayi (% 90) oluşturmaktadır. Gübre sanayindeki fosfatın % 60'ı süperfosfat, % 10'u fosforik asit ve % 10'u ise kompleks gübreler şeklinde kullanılmaktadır. Fosforun kimya endüstrisinde kullanılan payı yaklaşık % 10'dur ve en geniş kullanılma alanı deterjanlardır. Fosfatın burada kullanılan formları sodyumtripolifosfat, tetrasodyumpirofosfat ve sodyummetafosfat'tır. Monokalsik ve monosodik fosfatlar kabartma tozu imalatında; di ve trisodikfosfatlar suların yumuşatılmasında; sodyummetafosfatlar sondaj çamurlarının inceltilmesinde

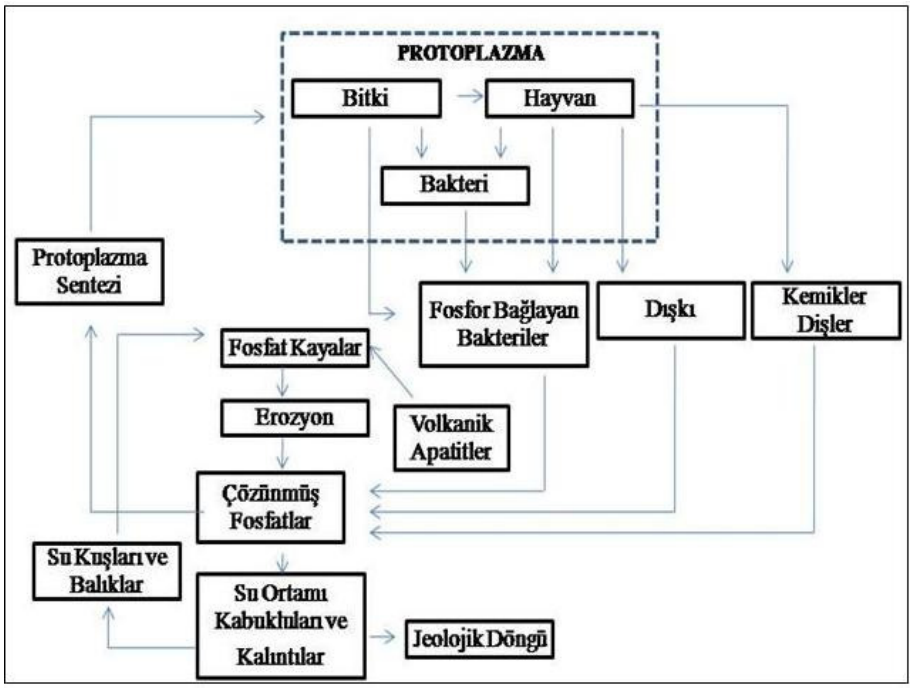
kullanılırlar. Metal yüzey işlemelerindeki rolü sebebiyle demir-çelik endüstrisinde de kullanımı mevcuttur [Berker, 1972].

Fosforun endüstrideki bu öneminin yanı sıra canlı yaşamı için olan önemli de göz ardı edilemez düzeydedir. ATP'nin enerji reaksiyonlarındaki birincil element olması sebebiyle fosfor canlı organizmaların metabolizmasında yer alan elzem bir element durumundadır. Fosfat türevleri de hemen hemen bütün yaşamsal öneme sahip metabolik faaliyetlerde bulunmalarının yanı sıra nükleik asitlerin, ko-enzimlerin ve fosfolipidlerin önemli bir yapıtaşıdır. Genellikle genetik kodların bulunduğu moleküler yapı olarak bilinen DNA'nın aslında fosforik asit diesterlerinin bir zinciri olması fosforun canlı hayatı üzerindeki önemini gösteren çarpıcı bir örnektir [Westheime, 1992].

Bu ve buna benzer özellikleri sebebiyle fosfor bitki, hayvan ve mikroorganizmaların yaşamlarını sürdürmede dolayısıyla da doğal ekosistemde ve tarımsal faaliyetlerde vazgeçilmez bir besi elementi olarak kabul edilmektedir. Öyle ki tarım yapılan topraklardaki eksikliği durumunda kimyasal ya da biyolojik kaynaklarla fosfor takviyesi yapılması kaçınılmaz olmaktadır. İnsan beslenmesinde de günlük olarak belli oranlarda fosfor bulunması gerekmektedir.

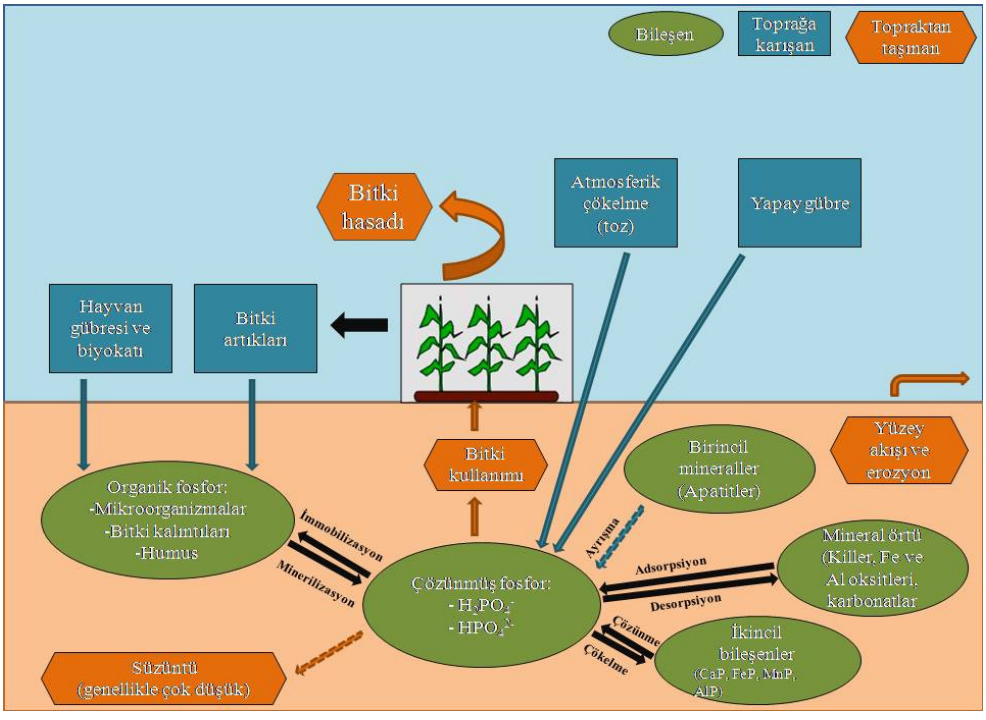
Doğadaki fosfor döngüsünü açıklamak amacıyla Şekil 2.1 aşağıda sunulmuştur. Fosforun gaz halindeki formu bulunmadığından atmosferde bulunmaz. Bu nedenle fosfor döngüsü kara, su ortamı ve sediment arasında gerçekleşmektedir. Fosfor döngüsü madde döngüleri arasında en yavaş ilerleyen döngüdür. Fosforun karadan su ortamına geçişi su ortamından karaya geçişine göre daha hızlıdır [Web 2, 2014].

Tarım alanlarından kaynaklanan TF taşınımı tezin önemli bir bölümünü oluşturduğundan karada gerçekleşen fosfor döngüsünün şematik gösterimi ayrı olarak Şekil 2.2'de sunulmaktadır [Web 3, 2014].



Şekil 2.1: Doğada fosfor döngüsü.

Şekilden de anlaşılacağı gibi su kaynakları (tatlı veya tuzlu su) ve burada yaşayan canlılar da fosfor döngüsü içerisinde yer almaktadır. Dolayısıyla doğal döngü içerisindeki fosforun su ortamında çeşitli sebeplerle aşırı birikmesi içerisinde bulunduğu su ortamıyla birlikte su ekosistemlerini de etkileyecektir.



Şekil 2.2: Toprakta fosfor döngüsü.

2.2. Fosforun Ötrofikasyona Etkileri

En kısa ifadeyle ötrofikasyon bir su ortamına (göl, nehir, deniz) aşırı besi elementlerinin (azot, fosfor) girişi sebebiyle oluşan biyolojik tepki olarak tanımlanabilir. Bu tepki genellikle su ortamında biyokütle artışı şeklinde görülmektedir [Beim et al., 1996]. Biyokütle ifadesini ölçülebilir kılmak amacıyla klorofil-a ölçümleri kullanılmaktadır.

Azot ve fosfor elementlerinin biyokütle artışına olan etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için biyokütleyi oluşturan en etkili mikroorganizma olan alg yosunlarının oluşum mekanizmasının bilinmesi faydalı olacaktır. Alg üretiminin hesaplanmasında, kullanılan azotun kaynağına göre, Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2'de verilen iki farklı reaksiyon denkleminden yararlanılır [Muslu, 2001].

- Azotun nitratlardan alınması durumunda;

$$106CO_2 + 16NO_3 + HPO_4 + 122H_2O + 18H^+ + \text{Eser miktardakielementler} + \text{Enerji} \longleftrightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1 + 138O_2 \quad (2.1)$$

- Amnonyak azotunun kaynak olarak kullanılması durumunda;

$$106CO_2 + 16NH_3^- + PO_4^{3-} + 66H_2O + \text{Eser miktardakielementler} + \text{Enerji} \longleftrightarrow CO_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P_1 + 118{,}5O_2 \quad (2.2)$$

Reaksiyon denklemlerinden de anlaşılacağı gibi karbon da alglerin yapı taşı olarak kullanılan önemli bir elementtir. Bununla birlikte doğada bulunan karbon kaynakları N ve P' a göre daha fazla olması sebebiyle ötrofikasyonu tetikleyen birincil element olarak değerlendirilmez. Algin stokiometrisinden oluşumu için gerekli olan azotun fosfora oranının 16/1 olduğu görülmektedir. Ağırlık olarak bakıldığında ise bu oran yaklaşık 7/1 şeklindedir. Su ortamında azot veya fosfor elementinden birinin bu oranları sağlayamayacak miktarlarda az bulunması o elementin ötrofikasyonu sınırlandırdığı diğer bir değişle ötrofikasyonun kontrolünde kilit element olduğu anlamını taşımaktadır.

Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD)'nin 1982 yılında yayımlanan çalışmasında, ötrofikasyona sebep olan bu iki besi maddesinin hangisinin göllerde sınırlandırıcı etkisi olduğu konusu geniş çaplı olarak

incelenmiştir [OECD, 1982]. Bu çalışmaya göre, ötrofikasyonu azotun mu yoksa fosforun mu sınırlandırdığı konusunda kesin sınırlar konulamayacağı belirtilmiştir. Bununla birlikte Tablo 2.1'de verilen ve dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan göllerde yapılmış çalışmalarla ortaya konulan N/P konsantrasyonu oranlarının derlenmesiyle oluşturulmuş aralıkların bir kılavuz olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [OECD, 1982].

Tablo 2.1: Göllerde N:P oranı olarak azot fosfor sınırlandırma seviyeleri.

TN/TF		TN/PO_4-P		Sınırlayıcı element
Ağırlık	Mol	Ağırlık	Mol	
< 10	22	< 5	10	N
10 –17		5 – 12		N ve/veya P
> 17	37.6	> 12	26.5	P

Ötrofikasyonu sınırlandıran elementin tahmininde kullanılan diğer bir yaklaşım ise su kaynaklarının ve kirletici kaynakların birlikte değerlendirilmesidir. Buna göre bir su kaynağına ulaşan kirleticiler çoğunlukla noktasal ise ve deşarjlardan önce fosfor giderimi yapılıyorsa su kaynağındaki üretimin P tarafından sınırlandırıldığı belirtilir. Büyük nehirler gibi yayılı kaynakların baskın kirletici kaynak olduğu durumlarda ise üretimin azot tarafından sınırlandırıldığı tahmin edilebilir [Muslu, 2001].

N/P konsantrasyon oranı bir fikir vermesi açısından önemli olmakla birlikte yanıltıcı olabilecek bazı durumlarla da karşılaşılabilir. Örneğin ötrofikasyona neden olan mavi-yeşil alg türlerinin atmosfer azotunu bağlayarak kullanabilme özellikleri bu şekilde kontrol edilmelerine engel olabilmektedir.

2.3. Ötrofikasyonun Zararları

Ötrofikasyonun zararlı etkisinin daha iyi bir şekilde açıklanabilmesi açısından su kaynaklarında sebep olduğu değişimler ve sonuçlarının aşağıdaki sınıflandırmayla verilmesi uygun görülmüştür [UNEP, 2000].

- Alg Patlamaları

Alg patlamaları ötrofikasyonun ilk sonuçlarından biridir. Özellikle siyanobakteriler, yüzeyinde oluşturdukları köpüklenmeyle su ortamının çözünmüş oksijen konsantrasyonunda ciddi azalma ve balık ölümlerinin yanı sıra oluşturdukları toksinlerle büyük baş hayvan ölümlerine sebep olmalarıyla bilinirler. İpliksi siyanobakteriler veya yeşil algler (chlorophytes) su arıtımında veya endüstriyel amaçlı kullanılan filtrelerin tıkanmasına sebep olurlar. Dinoflagellatalar da toksik ortamların oluşmasına neden olan diğer bir fitoplankton türüdür. Alg patlamalarında oluşan diğer bir yan ürün yüksek konsantrasyonda çözünmüş oksijendir. Bu durum dezenfeksiyon işlemi sırasında kanserojen ve mutojen yapıdaki trihalomethanların oluşumuna neden olabilmektedir.

- Sucul Bitkilerde Artış

Su sümbülü (Eichhornia crassipes), sualtı eğreltisi (Salvinia molesta) ve su marulu (Pistia stratiotes) gibi yoğun yapıdaki yüzer sucul bitkiler kıyı bölgelerine yakın bölgelerde geniş yüzeyler kaplayarak açık sulara kadar ilerleyebilirler. Bu durum güneş ışığının su altında bulunan damarlı bitkilere ve fitoplanktonlara ulaşmasını engeller. Ayrıca oluşan büyük miktardaki organik döküntü neticesinde anoksik ortamlar ile metan ve hidrojen sülfür gibi gazların yayılmasına neden olur. Bu bitkiler zooplankton ve balıkların ihtiyaç duyduğu besin öğeleri açısından da fakirdir. Bu sucul bitkilerin ortamda birikmesi balıkçılık ve rekreasyonel kullanımlar açısından da istenmeyen durumlar oluşturmaktadır. Sulama ve ulaşım kanalları ile ve hidroelektrik santrallerinin giriş bölümlerini tıkamaları da neden oldukları diğer olumsuzluklardır.

• Anoksik alanların oluşması

Önceki maddelerde de belirtildiği gibi alg ve sucul bitkilerde meydana gelen artış dolayısıyla organik madde miktarında da artış meydana gelmektedir. Bu organik materyalin su sütununda veya sedimentte bozulması çözünmüş oksijenin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum sığ göllerde ve bitki üretiminin fazla olduğu bölgelerde sediment ve suda çözünmüş oksijenin tamamen tükenmesine sebep olabilir. Balık ve diğer omurgasız canlıların yaşamasına uygun olmayan bu şartlar aynı zamanda amonyak, demir, mangan ve hidrojen sülfürü konsantrasyonunda artış oluşturarak biyota ve hidroelektrik enerji üreten tesislere de zarar verir. Dahası, sedimentten fosfat ve amonyumun tekrar suya geçmesiyle sudaki üretim tetiklenmiş olur.

• Türlerdeki Değişim

Yoğun alg patlamaları ve yüzen makrofitler sebebiyle su altına ulaşan ışığın azalması burada yaşayan bitkilerin de azalması veya yok olmasına neden olmaktadır. Besi kalitesinin bu şekilde değişmesi ve çözünmüş oksijen düzeyindeki düşüş sıklıkla balık türlerindeki değişim olarak karşımıza çıkmaktadır.

• Yüksek Nitrat Konsantrasyonu

Su kaynağına nitratça zengin deşarjların girmesi veya göl içerisinde amonyumun nitrifikasyonu sonucu nitrat konsantrasyonunun artması halk sağlığı açısından problem yaratabilmektedir. Sudaki nitrat konsantrasyonunun 10 mg/l' den fazla olması durumunda çocuklarda oksijenin kana geçememesi sonucu ortaya çıkan ve mavi bebek sendromu olarak bilinen hastalık görülebilir. Bu durum ölümcül sonuçlar doğurabilir.

• Su ile İlgili Hastalıklarda Artış

Ötrofikasyon bazı durumlarda arıtılmadan deşarj edilen kanalizasyon sularından da kaynaklanabilir. Bulaşıcı hastalık bulunan bir toplum kesiminin kanalizasyon suları sebebiyle bu hastalık dolaylı veya direk olarak su kaynağı aracılığıyla diğer kesimlere de yayılabilir. Bu durum daha çok fakirliğin ve bulaşıcı hastalık türlerinin fazla olduğutropikal bölge ülkelerinde görülmekle birlikte tüm ülkeleri ilgilendirmektedir. Gerçekten de tifo, kolera gibi hastalıkların ihmal edilebilecek

düzeyde hastalık bulunan kişiler aracılığıyla kirlenmiş bir su kaynağından su iletim borularıyla tüm şehre yayılması oldukça kolaydır.

3. HAVZA BAZLI MATEMATİK MODELLER

Su Kalitesi Kontrolü amacıyla kullanılan modeller, modelin uygulandığı ortama bağlı olarak iki başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar doğrudan ve sadece su kalitesinin çalışıldığı su kalitesi modelleri ve su kaynağının beslenme alanı olan havzayı da içine alan modelleridir.

Bu modelleme araçlarının geliştirilmesi ve uygulaması Avrupa Ülkelerinde belli bir süreden beri yapılmaktadır. Örneğin İngiltere'deki Hidroloji Enstitüsü, Fransa'daki SOGREAH grubu ve Danimarkadaki Danish Hydraulic Institute (DHI) tarafında 70'lerin sonunda hidrolojik çevrimin kara fazındaki bütün akış proseslerini içeren fiziksel bazlı Système Hydrologique Européen (SHE) modelini geliştirmişleridir [Graham and Butts, 2005]. 1980'lerin başından itibaren SHE modelinin geliştirildiği görülmektedir. DHI tarafından 1998 yılında, yüzeysel ve yeraltı sularında çeşitli bileşiklerin ve sedimentin taşınımını modelleyen MIKE SHE modelini geliştirmiştir [DHI, 2007]. Yüzey ve Yüzey altı ortamların modellendiği fiziksel tabanlı üç boyutlu (3D) SHETRAN modeli de sonlu farklar prensibi göz önünde bulundurularak ve SHE modeli temel alınarak geliştirilmiştir [Ewen et al., 2000].

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) tarafından 1994 yılında geliştirilen HBV-N modeli ise proses tabanlı bir modeldir. Bu model daha sonra havzada fosfor taşınmasını da içerecek şekilde geliştirilmişti [Andersson et al., 2005].

Swedish Agricultural University tarafından 1987'de SOIL ve SOILN modellerinin geliştirilmesiyle oluşturulan SOILN modeli (COUP Model) tek boyutlu, tarım alanlarındaki toprak profilinde azot dinamiğini ve kayıplarını modelleyen bir araçtır [Jansson and Moon, 2001].

INCA modeli 1998 yılında Reading üniversitesi bünyesinde bulunan Aquatik Çevre araştırmaları Merkezi tarafından proses bazlı bir modelleme aracı olarak geliştirilmiştir. Modeldeki kinetik formüller ile nehir ve havza ortamındaki temel mekanizmaların simülasyonu yapılabilmektedir [Collins et al., 1999].

Ampirik MONERIS modeli Leibniz Tatlısu Ekolojisi ve Kıta İçi Balıkçığı Enstitüsü (IGB Berlin) tarafından 1999 yılında geliştirilmiştir. Model çeşitli

noktasal ve yayılı kaynaklardan nehirlere ulaşan besi maddesi emisyonlarının belirlenmesini sağlamaktadır [Behrendt et al., 2007].

ANIMO modeli besi maddesi girişlerini ve hidrolojik verileri kullanarak, havzadaki doygun ve doygun olmayan toprak sistemlerinde karbon, azot ve fosfor döngülerini dinamik olarak modellemektedir [Schoumans et al., 2002]. Model Wageningen UR'de bulunan Winand Staring Merkezinde geliştirilmiş ve EUROHARP projesinde yer almıştır.

SWAT modeli 1990'lı yılların başında Dr. Jeff Arnold tarafından ABD' nin Tarım Departmanında (USDA) Tarım Araştırmaları Merkezi için geliştirim havza bazlı bir modeldir. Model farklı toprak, arazi kullanımı ve yönetime sahip havzalarda çeşitli yönetim uygulamalarının su, sediment ve tarımdan kaynaklanan kimyasal kirleticiler üzerindeki etkisini görmek amacıyla geliştirilmiştir [Neitsch et al., 2011]. SWAT fiziksel tabanlı bir modeldir. Girdi ve çıktılara arasındaki bağıntıyı kurmak için regresyon eşitlikleri yerine su, toprak özellikleri, topografya, bitki örtüsü ve arazi kullanımı gibi özellikleri kullanarak çıktıları fiziksel olarak modeller.

GSSHA modeli CASC2D modelinin yeniden düzenlenmesi ve geliştirilmiş şeklidir [Downer et al., 2006]. CASC2D hidrolojik akış modeli 2 boyutlu yüzeysel akış algoritması olarak APL programlama diliyle Colorado State Üniversitesinde geliştirilmiş ve yazılmıştır. GSSHA modeli CASC2D modeli kullanılarak geliştirilmiş olmakla birlikte ve infiltrayonun dışında akış mekanizmalarını modelleme açısından da farklıdır. GSSHA modeli giriş verileri açısından da farklıdır. Verilen hidrometeorolojik koşullarda çalışılan havzanın tepkisini modelleyen program fiziksel tabanlı ve hücresel yapılı haritalar ile çalışmaktadır. Temel giriş verileri olarak yağış, kar yağışı birikimi ve erimesi, infiltrasyon, buharlaşma-terleme, yüzeysel akış rotası, göllenme ve yönü, doygun olmayan alanlarda toprak nemi bütçesi, yeraltı suyu akımı, sulak alan bataklık hidroliği, sediment erozyonu, taşınım ve birikim, nehir sedimenti taşınımı, toprak yüzeyinde kirleticililerin taşınımı ve bitkiler tarafından tutulması sayılabilir.

Tüm havzanın hidrolojik döngüsünü modellemek üzere geliştirilen Stanford Watershed Modeli IV (SWM-IV) modeli geliştirilerek bugün US EPA aracılığıyla edinilebilecek olan HSPF modeli ismini almıştır. Model geçirimli ve geçirimsiz yüzey alanlarında ve nehirler ile tam karışımlı baraj göllerinin hidrolojik ve su

kalitesi ile ilgili proseslerinin modellenmesinde kullanılmaktadır [Shoemaker et al., 1997].

KINEROS2 modeli 1960'lı yılların sonunda bir tepeden aşağıya doğru meydana gelen yüzeysel akışın, sonunda bir kanala ulaşan tek boyutlu ve kaskat şeklinde yüzeysel akış olarak temsil edildiği bir araç olarak USDA'nın Güneybatı Havzası Araştırma Merkezi'nde geliştirilmiştir. KINEROS2 yayılı, fiziksel tabanlı ve olay bazlı olarak havzanın çoğunlukla karasal özelliklerinin kontrol ettiği dinamik infiltrasyon, yüzeysel akış ve erozyon gibi olayların modellenmesinde kullanılan bir araçtır [Semmens et al., 2008].

3.1. Türkiye'de Modelleme Araçlarının Kullanımı

Havza bazlı modelleme araçlarının Türkiye'de kullanımı 2000'li yılların son yarısında başlamıştır. Bunda Su Çerçeve Direktifi'nin Avrupa Birliği Ülkeleri'nde 2000 yılında uygulamaya girmesinin de etkili olduğu düşünülebilir. Gerek bakanlık tarafından gerekse akademik olarak yürütülen çalışmalarla direktifte belirtilen su kaynaklarının iyi duruma ulaştırılması amacıyla önceki bölümde belirtilen yazılımların kullanımı gerçekleştirilmiştir.

Köyceğiz Gölü - Dalyan Lagün Havzası'na gelen nutrient yükleri dağılımının ortaya konulması amacıyla [Adalı, 2004] tarafından gerçekleştirilen yayılı kirletici kaynaklardan gelen azot ve fosfor yüklerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı MONERIS modeli kullanılmıştır.

Gübre kullanımının Uluabat gölüne giren fosfor yüküne etkisini araştırmak üzere [Bulut and Aksoy, 2008] çalışmalarında ArcView Interface of Soil and Water Assessment Tool 2000 (AVSWAT) modelini uygulamışlardır.

Gediz havzasında bulunan Nif çayında yürütülen bir çalışmada [Esen and Uslu, 2008] tarımsal yayılı kaynaklardan gelen kirleticilerin azaltılması için sulama, gübreleme ve toprak sürümü gibi iyi yönetim uygulamalarının seçiminde "Simulator for Water Resources in Rural Basins" (SWRRB-WQ) modelleme aracı olarak kullanılmıştır.

Köyceğiz Havzasında havzanın hidrolojik yapısının ve mevcut yayılı kirleticilerin karakterizasyonunun, iklim ve arazi kullanımı değişiklikleri

durumunda, havzanın hidrolojisine ve yayılı kaynaklardan gelen kirletici yüklerine olan etkilerini belirlemek amacıyla BASINS (Beter Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources) ve Hidrolojik Simülasyon Programı-FORTRAN (HSPF) kullanılmıştır [Baloch, 2009].

Abdal ırmağı havzasında [Özbayrak, 2011] tarafından yürütülen çalışmada karar destek sistemleri kullanılarak havzadaki noktasal ve yayılı kirliliğin profili ile nedenleri belirlenmeye çalışılmış ve iyileştirme çalışmaları ve çevresel risk analizi yapılarak havza yönetim planında kullanılmak üzere çözüm önerileri sunulmuştur. Bu amaçla WARMF modelinin uygulaması yapılmıştır.

Yeşil Irmak havzasında iklim değişikliği ile diğer bazı çevresel değişimlerin nehirdeki nitrat konsantrasyonu değişimine olan etkisini inceleyen [Hadjikakou et al., 2011] bu amaçla üç farklı model dizisi kullanılmıştır. Bunlar, gelecekteki sıcaklık ve yağış durumunun modellendiği Bölgesel Sirkülasyon Modeli (BSM), bir kavramsal hidrolojik model olan HBV ve azot modeli INCA-N'dır.

İncelenen bu modelleme uygulamalarında ve diğer bazı yayımlanmamış çalışmalarda söz konusu modelleme araçlarının kalibrasyon ve verifikasyonunun genellikle kabul edilebilir aralıklarda olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu uygulamalardaki ortak problemin su kalitesi ve debi ölçümleri, arazi kullanımı ve meteorolojik ölçümler gibi verilerin yeterli sıklık ve sürede üretilmiyor olması olarak tespit belirtilmiştir. İstasyon bazında yapılan ölçümlerin temsil ettiği alanların sınırlı olması başka bir ifadeyle istasyon sayısındaki yetersizlik de diğer bir sorun olarak Türkiye'de yürütülen havza modelleme çalışmalarında görülen problemlerden biridir.

4. MEPhos MODELİ ve ÇALIŞMA ALANINA UYARLANMASI

Almanya - Julich araştırma merkezi araştırmacıları özellikle topraktaki ve yeraltısuyundaki kirletici (örneğin tarımda kullanılan gübreler) girişlerini ve bunların taşınmasını simüle eden diğer bazı modeller geliştirmişlerdir [Gömann et al., 2005], [Kunkel et al., 2008], [Wendland et al., 2007]. Bu bağlamda yapılan çalışmalardan sonra fosforun taşınım yollarını ve alansal olarak değişimini modelleyen MEPhos geliştirilmiştir [Tetzlaff, 2006], [Tetzlaff and Wendland, 2007], [Tetzlaff et al., 2009].

Yüzeysel sulara yayılı fosfor girişleri, fosfotop bazında çalışılan alana özgü olarak modellenmiştir. Fosfotoplar belirlenmiş alansal özellikleri olan homojen alt bölgelerdir ve nehir havzasında belirli bölgeleri temsil etmek için kullanılırlar. Fosfotopların elde edilebilmesi için yüksek çözünürlükteki veri kaynakları GIS yazılımı kullanılarak işlenir. Bu yaklaşım, fosfor girdisinin fazla olduğu alanlar gibi, yüksek öneme sahip alanların belirlenmesini sağlar. Bu alanların doğal ve tarımsal özellikleri bilindiği için etkin kirlilik azaltıcı önlemler önerilebilir [Tetzlaff, 2006].

Akışa geçen yağmur suyu ile ilgili yıllık ortalama bileşenlerin (yüzeysel akış, yeraltı suyu akışı vb.) belirlenebilmesi için MEPhos modeli bir su bütçesi modeli olan GROWA modeli ile birleştirilmiştir. GROWA modeli [Kunkel and Wendland, 2002], [Tetzlaff et al., 2009] ortalama yıllık yağış miktarını, yüzeysel akışı ve yeraltısuyuna geçen akışı 50 x50 m² çözünürlükte sunan bir modeldir. Yüksek çözünürlüklü mekansal verilerin azlığı nedeniyle nehir havzasındaki yağmur suyu kanallarından ve birleşik sistem kanallarından gelen ortalama yıllık fosfor yüklerinin bütünleşik olarak modellenmesi zorunludur. Evsel atıksu arıtma tesislerinden ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden gelen fosfor yükleri ise ayrı ayrı modellenmektedir.

Tespit edilen kaynaklarda gelen fosfor girişlerinin hesaplanmasından sonra alt havzanın toplam fosfor yükünün belirlenmesi için elde edilen değerler toplanır. Daha sonra bu değer, bir üst havzanın değerine eklenir ve fosforun bekleme süresinden kaynaklanan azalma bundan çıkartılır (Eşitlik 4.1). Bu yöntem ile

modellenen fosfor yükleri ve ölçüm değerleri karşılaştırılarak modelin geçerliliği sağlanır.

$$F_{EZG} = \left(\left(F_{Gw} + F_{Es} \right) + \sum F_{Sp} + \sum F_{ID} + \sum F_{Mw} \right) + F_{OL} - R_F - R_S \qquad (4.1)$$

Eşitlik 4.1' de modelin çalışma alanına uyarlanmasından sonraki TF girişleri yer almaktadır. Burada, F_{EZG} alt havza için tahmin edilen fosfor yükü (t/yıl), F_{Gw} yeraltı suyu ile gelen fosfor yükü (t/yıl), F_{Es} erozyonla gelen fosfor yükü (t/yıl), F_{Sp} foseptik sistemden gelen fosfor yükü (t/yıl),F_{Mw} evsel atıksu arıtma tesislerinden gelen fosfor yükü (t/yıl), F_{ID} endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden gelen fosfor yükü (t/yıl), F_{OL} bir üst havzanın fosfor yükü (t/yıl), R_F akarsulardaki fosforun bekleme süresinden kaynaklanan azalma (t/yıl) ve R_S durgun sulardaki fosforun bekleme süresinden kaynaklanan azalmadır(t/yıl).

Biriken fosforun durgun sularda ve akarsulardaki modellenmesi ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 4.6) [Tetzlaff and Wendland, 2007]. MEPhos nehirlerdeki biriken fosforun modellemesi için [Behrendt and Opitz, 2000] tarafından geliştirilen bir yaklaşımı kullanmaktadır (Eşitlik 4.2);

$$F = \frac{1}{1 + R_F} \cdot E \text{ ve } R_F = a \cdot q^b \qquad (4.2)$$

Burada F akarsular için modellenen yük (t/yıl), R_F akarsulardaki fosforun bekleme süresini tanımlayan faktör, modellenen fosfor emisyonunun toplamı (t/yıl), q alan başına olan deşarjlar (l/(s·km²)), a, b havza büyüklüğünün etkisini gösteren katsayılardır.

Eşitlik 4.2, rezervuarlarda yüksek sedimantasyon oranları kadar azalan akış hızı ve artan bekleme süresi gibi nedenlerden dolayı oluşan artan fosfor birikimini yansıtamaz. Bunun sonucu olarak, partiküler fosfor yükü azalan askıda madde olarak transfer edilmiştir. Bu nedenle MEPhos modelinde, rezervuarlarda ve baraj göllerindeki fosfor birikimi Eşitlik 4.3'e göre hesaplanmaktadır [Molot and Dillon, 1993];

$$R_S = \prod \exp(-k_r \cdot q^{-1}) \qquad (4.3)$$

Burada R_S rezervuarlarda fosfor birikimi, k_r birikme katsayısı (çökelme hızı) (m/y), q^{-1} rezervuarın alansal hidrolik yükü (y/m) olarak verilmektedir.

4.1. Erozyon Kaynaklı TF yüklerinin belirlenmesi

Erozyondan kaynaklanan TF yüklerinin hesabında kullanılan formül, Eşitlik 4.4'te sunulmuştur.

$$L_{EP} = E_s \times SDR \times P_s \times ER \tag{4.4}$$

Burada, L_{EP}, erozyondan kaynaklanan TF yükü, (t/ha.yıl), *ES*, hesaplanan toplam yıllık toprak kaybı, (t/ha.yıl), *SDR*, sediment iletim oranı, (%) *PS*, üst toprak TF içeriği (mg/kg) *ER*, zenginleştirme oranını (enrichment ratio) göstermektedir.

Porsuk havzasındaki toprak kaybı miktarı Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından USLE (Üniversal Toprak Kayıpları Eşitliği) ve RUSLE (Modifiye Üniversal Toprak Kayıpları Eşitliği) metotları ile belirlenen Türkiye Erozyon Haritası kullanılarak belirlenmiştir.

Bu formülde sediment iletim oranı Türkiyenin geneli için sediment iletim oranı Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin 2005 yılında yayımlanan raporuna göre %20 civarındadır. Bu nedenle Porsuk havzasındaki sediment iletim oranı olarak %20 değeri kullanılmıştır.

MEPhos modelinde üst toprakta bulunan fosfor içeriği başka bir modelleme aracı olan RAUMIS modeli kullanılarak belirlenmektedir. Bu amaçla RAUMIS modeli çalışılan bölgeye ait hayvancılık ve tarıma yönelik istatistiki bilgileri kullanmaktadır. Gerek bu verilerin elde edilmesindeki güçlükler gerekse ölçümle toprak TF içeriğinin belirlenmesinin gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmeyi sağlaması sebebiyle toprak TF içeriğinin toprak analizleriyle elde edilmesi uygun görülmüştür.

Erozyonla taşınan toprağın küçük tane çapına sahip olması sebebiyle bu taşınan torakta tutunan P içeriği ana topraktakinde daha fazladır. Bu nedenle erozyonla su kaynaklarına taşınan toraktaki P içeriğinin erozyona uprayan topraktan daha zengin olduğu kabul edilir. Buradaki zenginleşme oranı da taşınan topraktaki P içeriğinin üst toprak P içeriğine oranlanması elde edilir [Sharpley,

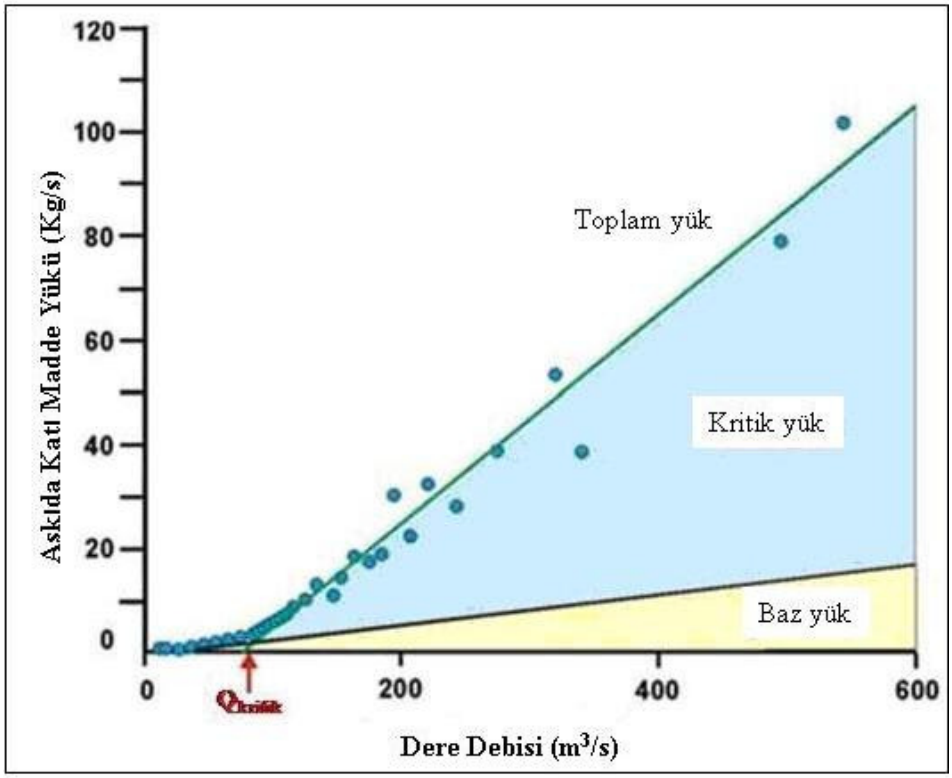
1980]. MEPhos modelinde uygulanan bu yöntemin ayrıntıları aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

4.1.1. Zenginleştirme Oranının (Enrichment Ratio- ER) belirlenmesi

Tez çalışmasında topraktaki TF zenginleştirme oranın belirlenmesinde MEPhos modelinde yeralan yöntem uygulanmıştır. Metodun uygulanması için istasyonlarda ölçülen akarsu debi değerleri, TF, ortofosfor (Orto-P) ve askıda katı madde konsantrasyonu verileri gereklidir [Tetzlaff et al., 2009].

Bu metoda göre öncelikle akarsuda erozyondan kaynaklanan ve akarsuyun kendi bünyesinden ileri gelen katı maddelerin ayrılması gerekmektedir. Günlük debi değerlerine karşılık askıda katı madde konsantrasyonu değişimini gösteren grafikten faydalanılarak her bir istasyon için bir kritik debi (Q_{krit}) değeri tespit edilir (Şekil 4.1). Burada Q_{krit} söz konusu istasyondaki askıda katı madde yükü eğrisinin belirgin bir şekilde değiştiği noktadaki debi değerini göstermektedir. Bu debi değerinin üzerindeki debi değerlerinde ölçülen PP'un aşırı yüzeysel akışın oluştuğu durumlarda ve erozyondan kaynaklandığı kabul edilmektedir. Bu değerin altındaysa askıda katı maddelerin nehir yatağının kendi yapısından ve noktasal kaynaklardan ileri geldiği kabulü yapılır. Partiküler fosforun kritik debinin üstündeki debiler (toplam yük) ve altındaki debiler (baz yük) için yük değerleri Şekil 4.1'de verilen grafik yardımıyla elde edilir. Partiküler fosfor için kritik yük değeri ise toplam yükten baz yükün çıkartılması ile elde edilir. Buradan sonra zenginleştirme oranı (*ER*), kritik PP yükü değerinin bu akarsuya hidrolojik olarak bağlı ve erozyon riski bulunan toprağın üst katmanında ölçülen TF konsantrasyonuna oranı ile hesaplanır [Tetzlaff et al., 2009].

MEPhos modelinde yer alan bu metodun uygulanması neticesinde havzanın ortalama zenginleştirme oranı değeri yaklaşık 2,0 olarak belirlenmiştir. Bu değer Avrupa'da yürtülen bir araştırmada 1,86 olarak tespit edilmiştir [Gerlinger and Scherer, 1997]. Amerik Birleşik Devletleri'nin batı bölgesinde yürütülen diğer bir çalışmada zenginleştirme oranını 1,5 olarak bulmuştur [Sharpley, 1985]. Buna göre tez çalışmasında elde edilen ER değeri literatür değerleri ile uyum göstermektedir.



Şekil 4.1: Kritik askıda katı madde yükü belirleme grafiği.

4.1.2. Yeraltı Suyundan Kaynaklanan TF Yükünün Hesabı

Modelde göz önünde bulundurulan diğer bir yayılı kaynak yeraltısuyunun yüzeysel suları beslemesi ile taşınan TF yüküdür. Bu nedenle havzadaki yeraltısuyu deşarjının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Bölüm 4'de belirtilen su bütçesi modeli GROWA, MEPhos modeline entegre edilmiştir ve havzanın su bütçesi bileşenlerinden yeraltı suyu deşarjı miktarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Model için gerekli olan veri setleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1: GROWA modelinin uygulaması için gerekli veri setleri.

Veri Türü	İçerik
Meteorolojik veri	Türkiye yağış haritası İstasyonlarda ölçülen yağış ve buharlaşma verileri
Topografya	Sayısal yükseklik modeli
Arazi kullanımı verisi	Sayısal arazi kullanım haritası
Toprak verisi	Dijital toprak haritası - Ana toprak grupları Su sızma etkinliği Su tablası yüksekliği Bitki kök derinliği Efektif su tutma kapasitesi Yeraltı suyu kapiler yükselme değeri
Hidrojeolojik veri	Sayısal Hidroloji ve Jeoloji haritaları
Akarsu debi ölçümleri (Validasyon amacıyla)	Akış gözlem istasyonu verileri

GROWA, model sonuçlarını yıllık ortalama değerler olarak sunmaktadır. Bu nedenle uzun vadeli olarak yeraltı suyu beslemesi ve yeraltı suyu deşarjı arasında bir denge olduğunu kabul etmektedir [Wendland et al., 2009]. GROWA modelinde, yeraltısuyu beslenmesinin hesaplanması amacıyla toplam akışa geçen yağış, direk yüzeysel akış ve topraktan yeraltısuyuna süzülen akış şeklinde iki kısma ayrılır. Topraktan süzülen su uzun vadede yeraltısuyu beslemesini sağlamaktadır [Peschke, 1997]. Aşağıda verilen Eşitlik 4.5 ile toprak boyunca akışa geçen su bir "taban akış indisi" (BFI) yardımıyla ifade edilmektedir [Dörhöfer and Josopait, 1980], [Hennings, 2000]. Bu yöntemle yeraltısuyu beslenmesi, $GW_{recharge}$, toplam akışa (Q_{toplam}) bağlı olarak verilmiştir.

$$GW_{recharge} = BFI \cdot Q_{total} \tag{4.5}$$

BFI değeri bazı özel koşullara bağlıdır ve uzun vadede yaklaşık olarak sabit kabul edilir. Tüm Porsuk baraj havzasında yeraltısuyu beslenmesinin belirlenebilmesi için, BFI değerlerinin tüm alana yayılması gerekmektedir. BFI değerlerinin belirlenmesinde aşağıda detaylı olarak anlatılan 3 adımlı bir işlem uygulanmıştır.

Birinci adımda, her bir alt-havza için BFI değerlerinin bulunması amacıyla istasyonlarda gözlemlenen akış bilgileri kullanılır. Havza bazındaki BFI değerleri (BFI_{havza}) Eşitlik 4.6' da verilmiştir:

$$BFI_{havza} = Q_G / MQ \tag{4.6}$$

Burada *MQ*, Yıllık ortalama nehir debisi [m³/sn], *QG*, Yeraltısuyu deşarjı [m³/sn]

Wundt (1958), yeraltısuyundan yüzeysel akışa dönüşen akışı belirlemek amacıyla, uzun süren bir çalışma neticesinde en düşük seviyedeki aylık yeraltısuyu deşarjlarından elde edilen (MoMLR) metodunu önermiştir (MoMLR metodu).

$$Q_G \approx MoMLR = \sum_{i}^{n} MoLR_i / n \tag{4.7}$$

Birinci yaklaşımda, MoMLR değeri dış etmenlerden etkilenmemiş ve yumuşak bir zeminde yer alan nehrin yeraltısuyu deşarjını ifade etmektedir. Bu özellikteki bir havzada MoMLR değeri yeraltısuyu beslemesi için uygun bir ölçü olarak kabul edilebilir. GROWA modelinin Elbe [Ralf Kunkel and Wendland, 1998] ve Lower Saxony [Dörhöfer et al., 2001] havzaları uygulamalarında, MoMLR metodunun kullanılmasıyla makul akış oranlarının elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

Bununla birlikte, konsolide kayaçların hakim olduğu arazilerde, MoMLR metodunun da içerdiği aylık en düşük deşarj direk yüzeysel akışın bazı özel bileşenlerini (yüzeysel akış ve toprak içindeki akış) içerdiğinden, MoMLR-değerleri ortalama yeraltısuyu beslemesini ifade edememektedir. Bu nedenle sert kayalık araziler için, tarafından geliştirilen ve toprak katmanlarında meydana gelen akış vasıtasıyla MoMLR değerinin düşmesini sağlayan bir metot uygulanmıştır [Kille, 1970], [Demuth, 1993].

Grafik Kille-metodu [Kille, 1970], tek tek MoMLR değerlerinin artan bir sıraya göre düzenlendiği Wundt metodunun bir modifikasyonudur. Bu şekilde iki kısma (Tip-I S şekilli, Tip II parabolik) ayrılan bir eklemeli sıklık elde edilmiştir [Demuth, 1993]. Kille metodu, dağılımın lineer kısmından bir doğru geçirilerek, sadece Tip-I'e uygulanabilmektedir. Kille'ye göre akışlar arasındaki geçiş

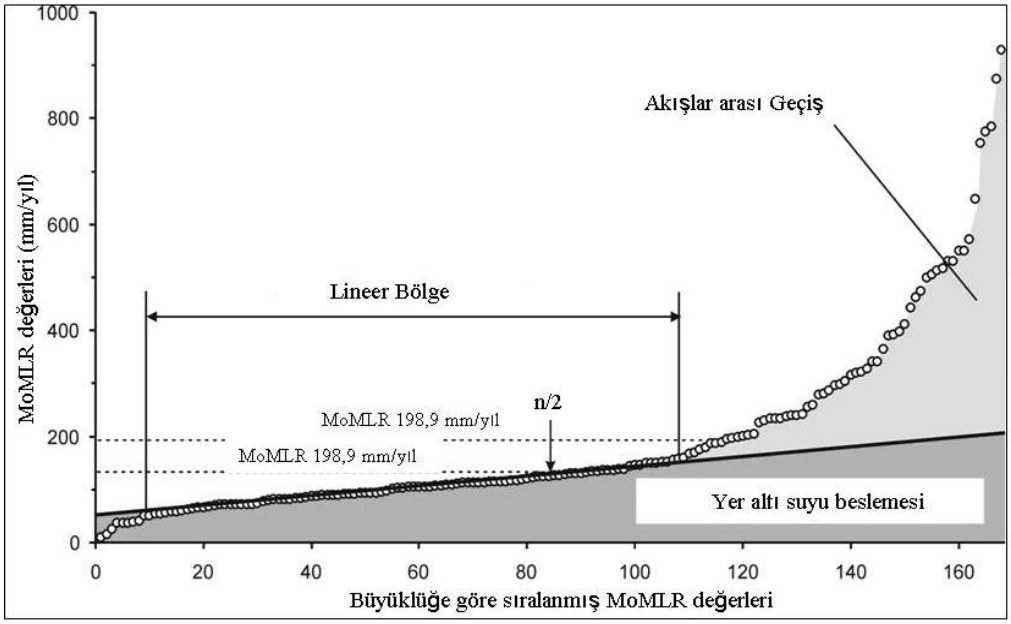
(MoMLRr) tarafından düşürülen MoMLR değeri, y-eksenindeki dağılımın orta kısmında okunmakta ve ortalama yeraltısuyu beslemesine karşılık gelmektedir.

Eklemeli sıklık verilerinin lineer kısmı, regresyon analizi yardımıyla, MoMLR değerlerinin tanımlı olduğu kümelerin sürekli azaltılması şeklinde oluşturulmuştur. Bu amaçla her iterasyon adımında max. ve min. MoMLR değerleri atılmıştır. Bu işlem, regresyon analizi sonunda en yüksek regresyon sabitinin elde edilmesiyle tamamlanmıştır.

Sonuç olarak, eğim, *m*; MoMLR-değerleri *n* ve *x* ekseninin kesim noktası y_0 yardımıyla MoMLRr-değeri hesaplanır:

$$MoMLRr = m \cdot \frac{n}{2} + y_0 \tag{4.8}$$

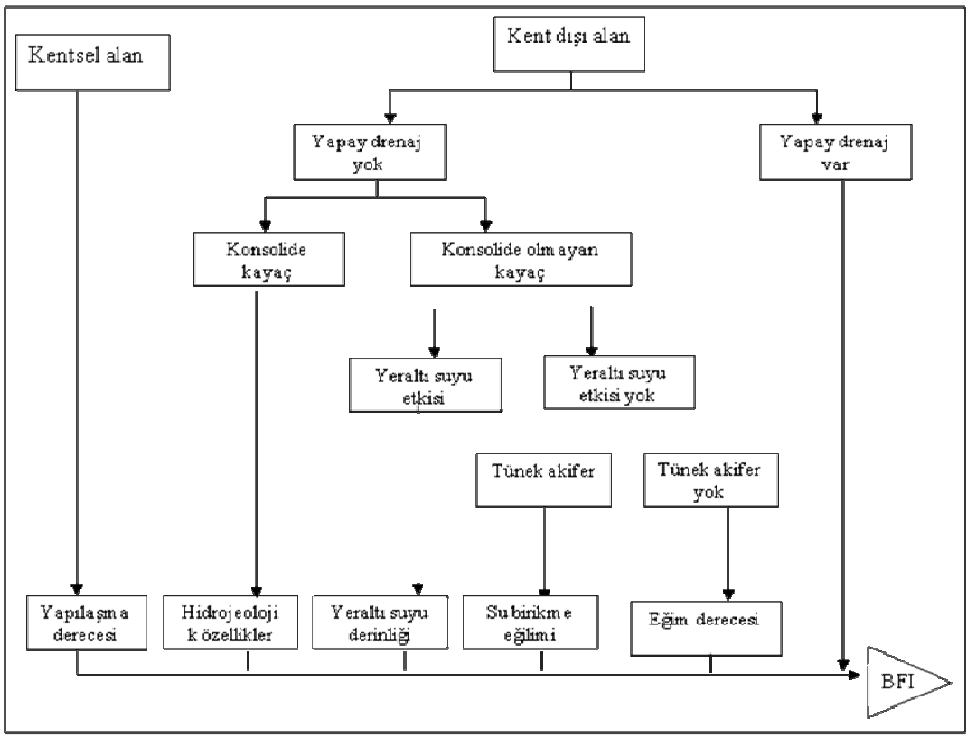
Şekil 4.2'deki verilen örnek istasyonun grafiğinde yüzeysel akışın elimine edilmesi şeklinde uygulanan MoMLRr metodunun farkı görülmektedir.



Şekil 4.2: Konsolide kayaçların bulunduğu alanlarda bileşeninin yeraltısuyu deşarjından ayrılması (MoMLRr- metodu).

İncelenen havza için, ortalama bölgesel BFI değerlerinin, akış verilerine dayanarak, elde edilmesinin ardından bu değerler yeterli noktasal verinin bulunmadığı yerlere dağıtılarak transfer edilir. Bu işlem sırasında yüzeysel akışı etkileyen parametrelerin özellikleri hesaba katılır. Şekil 4.3 BFI değerlerinin tüm

havzaya dağıtımında izlenen adımları ve göz önünde bulundurulan parametreleri göstermektedir.



Şekil 4.3: GROWA modelinde yeraltısuyu beslemesini belirleyen karakteristikler.

Sonuç olarak, bu ardışık yaklaşım 5 adıma bölünmektedir. İlk önce, yapılaşma bulunan yerlerde, her bir arazi unsurunda veya grid hücresinde yeraltısuyu beslemesinin önemsiz miktarda olduğu kabulü yapılır.

Arazilerin yapılaşma derecesinin belirlenmesinde bitki örtüsü verileri kullanılmaktadır. Porsuk Baraj Havzasına ait hidrojeolojik özellikler DSİ tarafından sağlanan hidrojeoloji haritalardan, toprak özellikleri ile ilgili temel bazı veriler ise Toprak Dijital Bilgi Sisteminden elde edilmiştir. Topoğrafik verilerin elde edilmesinde SAM50 sayısal arazi modeli (SAM) baz alınmıştır.

Yeraltısuyu deşarj debisinin belirlenmesinin ardından yeraltı suyu deşarjından kaynaklı TF yükünün tespit edilmesi amacıyla yeraltı suyunda akiferleri oluşturan kayaçların türlerinin göz önünde bulundurulduğu TF konsantrasyonu değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tez çalışmasında, bölgede yeraltısuyu akiferleri bazında yapılan TF ölçümleri bulunmadığından, literatürde yapılan 2 çalışmadan faydalanılmıştır. Ancak bu iki çalışmada da TF yerine Orto-P değeri ölçümü yapılmıştır. Burada yeraltı suyunda organik fosfor miktarının ihmal edilebilir

düzeyde olacağı düşünülerek Orto-P konsantrasyonunun TF konsantrasyonuna yakın olacağı kabulü yapılmıştır. Çeşitli türdeki kayaçlardan oluşan akiferlerden alınan numunelerde Orto-P parametresi ölçülmüş ve elde edilen veriler istatistiki olarak değerlendirilerek belli bir akifer türü için geçerli olan ortalama Orto-P konsantrasyonları tespit edilmiştir [Mederer et a., 1998], Kunkel et al., 2004]

Elde edilen yearltı suyu deşarjı ve Orto-P konsantrasyonları kullanılarak yeraltısuyu ile taşınan TF yükünün belirlenmesinde kullanılan yaklaşım kısaca Eşitlik 4.9'da verilmektedir.

$$F_{GW} = Q_G \cdot C_P \cdot 1{,}029 \tag{4.9}$$

Burada F_{GW} yeraltı suyu ile taşınan fosfor yükü (t/yıl), Q_G yeraltı suyu deşarjı (m^3/sn), C_P belirli bir jeolojik kayaç türü için tespit edilen Orto-P konsantrasyonu (mg/l) ifade etmektedir. Tüm havza için modellenen TF yükü değerleri MEPhos modelindeki GIS arayüzü yardımıyla alansal bazda haritalar olarak sunulmakta böylece girdilerin yoğun olduğu bölgeler tespit edilebilmektedir.

4.1.3. Evsel ve Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesislerinden Gelen TF Yükü Hesabı

MEPhos modelinde temel olarak atıksu arıtma tesislerinden gelen TF yüklerinin hesabı aynı formülle hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.10'da verilen ifadeden anlaşılacağı gibi arıtma tesislerinin deşarj debileri ve TF konsantrasyonu ölçümleri hesaplama için gerekli verilerdir.

$$F_{KA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (C\dot{I}_{Pges,Abl} \cdot AWM) \tag{4.10}$$

Burada F_{KA} evsel veya endüstriyel atıksu arıtma tesisinden gelen yıllık TF yükünü (t/yıl); AWM, atıksu arıtma tesisinin yıllık ortalama deşarj debisini (m^3/yıl); $C\dot{I}_{Pges,Abl}$ deşarj edilen atıksuyun ortalama TF konsantrasyonu (mg/l); *i*, geçerli ölçümü ve *n*, yılda yapılan ölçüm sayısını ifade etmektedir.

4.2. MEPhos' un Türkiye Şartlarına Uyarlanması

MEPhos modelinin çalışma alanı olan Porsuk Baraj gölü havzasının karakteristik özelliklerini yansıtabilmesi amacıyla kirletici kaynak bazında ve tarımsal erozyondan kaynaklanan TF yükünün belirlenmesi yönteminde değişiklik yapılmıştır.

Öncelikle havzadaki kirletici kaynaklar incelenmiş ve havzada bulunmayan yapay drenaj alanları modelden çıkartılmıştır. Ayrıca yerleşim alanları ticari alanlar gibi yüzey geçiriminin olmadığı bölgelerden kaynaklanan yağmur suyu yüzeysel akışı da tez çalışmasında ihmal edilmiştir. Bunun sebebi havzada bu özellikteki arazi kullanımı oranının (% 1) ihmal edilebilir düzeyde olmasıdır. Bununla birlikte MEPhos modelinde bulunmayan bir atıksu uzaklaştırma sistemi olan ve çalışma bölgesindeki hemen her yerleşim biriminde kullanılan foseptikler modele entegre edilmiştir.

İkinci olarak tarım alanlarından kaynaklanan erozyonun neden olduğu yayılı TF yükünün modellenmesi aşamasında MEPhos modeli yerel şartları daha iyi yansıtabilmesi açısından modifiye edilmiştir. Bölüm 4.1'de de bahsedildiği gibi önceki versiyonda MEPhos modeli üst toprakta bulunabilecek TF içeriğini RAUMIS modeli ile entegre olarak hesap yöntemi ile tahmin eden bir modüle sahip. Ancak bu modülün uygulanmasında gerekli olan istatistiki bilgiler ülkemizde üretilmediği ya da ulaşılabilirliği zor olduğundan ve ölçüm ile belirlenecek değerler gerçeğe daha yakın olacağından toraktaki TF içeriğinin modele doğrudan girilmesi şeklinde bir değişiklik yapılmıştır.

Bu iki düzenlemenin ayrıntıları takip eden bölümlerde açıklanmıştır.

4.2.1. Foseptiklerden Gelen Yüklerin Hesabı ve Model Katsayılarının Belirlenmesi

Bölgedeki foseptik karakteristiklerinin belirlenmesi ve modelde kullanılacak katsayıların tespit edilmesi amacıyla bir seri arazi gezisi yapılmıştır. Bu gezilerde Kütahya İl Özel İdaresi yetkilileri ile görüşülmüş ve foseptiklerin teknik detayları hakkında ayrıntılı bilgi alınmıştır.

Bölgede bulunana foseptiklerin deşarjlarında herhangi bir parametrenin ölçümü yapılmadığından seçilen foseptiklerde TF konsantrasyonu ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla 2011 yılı Temmuz ayı içerisinde nüfusları 109- 5538 arasında değişen 7 adet yerleşim yerinin foseptiklerinden alınan numunelerde TF konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Analizler standart metod kullanılarak STM 4500-P B method' a göre yapılmıştır. TF ICP-OES Optima 7000 DV cihazı kullanılmıştır. Yerleşim yerlerinin isimleri ve analiz sonuçları Tablo 4.2'de sunulmaktadır.

Tablo 4.2: Foseptiklerde yapılan TF ölçüm sonuçları.

Yerleşim yeri adı	Nüfus (kişi)	TF konsantrasyonu (mg/l)
Kızılcakaya	109	1,43
Sabuncupınar	239	2,35
Erenköy	363	1,89
Doğalar	494	6,47
Enne	535	3,28
Demirciören	748	5,96
Altıntaş	5538	9,46

Yapılan ölçüm sonuçları literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Güney Kore'de yürütülen çalışmada küçük ve kırsal bir yerleşim yerinin atıksu deşarjında ölçülen TF konsantrasyonu 2,2 mg/l olarak verilmiştir [Myung and Yu, 2002]. Türkiye'nin güneyinde yer alan bazı tatil köylerinin atıksularında ise TF konsantrasyonları 6,1 – 7,0 – 9,0 mg/l olarak verilmiştir [Sarikaya, et al. 2002].

Yeni Zelanda'da yaklaşık 6000 kişilik nüfusa sahip bir yerleşim yerinin atıksu arıtma tesisi (AAT) deşarjında yapılan ölçümlerde TF konsantrasyonunun 8,2-8,9 mg/l aralında değiştiği belirtilmiştir [Shilton et al., 2006]. Ayrıca, evsel nitelikli atıksu deşarjlarındaki TF konsantrasyonu değerlerini tipik olarak düşük (low), orta (medium) ve yüksek (high) olarak sınıflandırmak da mümkündür. Bu sınıflandırma için verilen TF konsantrasyon aalıkları sırasyla 4 – 7 – 12 mg/l olarak verilebilir [Tchobanoglous and Burton, 2003]. Buna göre arazi gezileri ile foseptiklerde ölçülen TF konsantrasyonu değerlerinin bu konudaki literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma ile TF konsantrasyonunun belirlenmesinin ardından ölçüm yapılmayan diğer yerleşim yerlerine ait foseptikler için de yaklaşık bir TF konsantrasyonu değeri nüfusları ile orantılı olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanındaki foseptiklerde düzenli izlemeler yapılamadığından atıksu debi değerleri de herhangi bir resmi kurum tarafından ölçülmemektedir. Bu nedenle TF yükünün hesaplanmasında kullanılmak üzere gerekli olan atıksu debisi Türkiye şartlarını daha iyi yansıttığı düşünüldüğünden Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı (Yeni ismi Orman ve Su İşleri Bakanlığı) tarafından önerilen yaklaşıma göre hesap yoluyla belirlenmiştir [ResGaz 1]. Bu yaklaşıma göre havzadaki yerleşim birimlerinde belirlenen atıksu oluşum miktarları 80 - 100 L/kişi arasında değişmektedir.

Buna göre her bir foseptik için TF yükü Eşitlik 4.11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$F_{CS} = CI_{PST} \times q_i \times P_j \tag{4.11}$$

Burada, CI_{PST}; belirlenen TF konsantrasyonu (mg/l), q_i; tespit edilen atıksu oluşum miktarı, (L/kişi.gün), P_J ; foseptiğin bağlı olduğu yerleşim yerindeki nüfus (nüfus), i, j ; nüfus aralığı ve geçerli yıl için gerekli indisler olarak verilmektedir

4.2.2. Üst Toprak TF İçeriğinin Belirlenmesi

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi model için gerekli olan üst toprak TF içeriğinin belirlenmesi doğrudan toprak analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

Arazi kullanım özellikleri yayılı TF yükü belirlenmesinde kilit öneme sahip olduğundan [Wu et al., 2011], numune alma noktaları farklı arazi kullanım özelliklerindeki topraklar temsil edilecek şekilde belirlenmiştir. Buna göre 9 farklı arazi kullanım özelliğini ve 4 farklı toprak türünü temsil eden 27 farklı noktadan toprak örnekleri alınmıştır. Tez çalışmasında, sadece havzadaki tarım alanlarında meydana gelen toprak kaybı neticesindeki TF yükleri dikkate alınmış olmakla birlikte farklılıkların tespit edilebilmesi için diğer arazi kullanımlarındaki topraklarda da TF ölçümleri yapılması uygun görülmüştür. Örnekleme çalışmaları sırasında çekilen görüntüler Şekil 4.4'te sunulmaktadır.



a) b)

Şekil 4.4: Toprak numunesi alma çalışmaları. a) mera alanı, b) sebze bahçesi.

Her bir numune alma noktası orman, sulamalı veya kuru tarım, mera gibi farklı arazi kullanımını temsil etmektedir. Üst toprağın 5 cm derinliğinden 10 cm çapında alınan numuneler laboratuar ortamında kurumaya bırakılarak analiz için 2 mm çaplı elekten geçirilmiştir. Partiküler fosforun ortofosfata dönüşümü için aqua–regia çözeltisi ile parçalama yöntemi uygulanmıştır [Siewers et al., 2003]. Çözeltiye geçirilen TF konsantrasyonu ICP-OES Optima 7000 DV ile analiz edilmiştir.

Analiz sonucunda elde edilen değerlerin literatür değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu konudaki literatür çalışması sınırlı olmakla birlikte Orta Anadolu'da yürütülen bir çalışmada topraktaki TF konsantrasyonunun 169,2 ve 1123,2 mg/kg arasında değiştiği bilgisi verilmiştir [Kacar, 1965]. Orta Anadolu'nun kuzeyinde ve güneyinde yapılan çalışmalarda ise TF değerleri sırasıyla 146,2 – 1849,6 mg/kg ve

362,4- 1123,9 mg/kg, arasında değişmektedir [Celebi, 1974], [Alganatay, 1968]. Tablo 4.3'de toprak analizlerinde ölçülen ortalama TF konsantrasyonları ve ilgili arazi kullanımı türü verilmektedir.

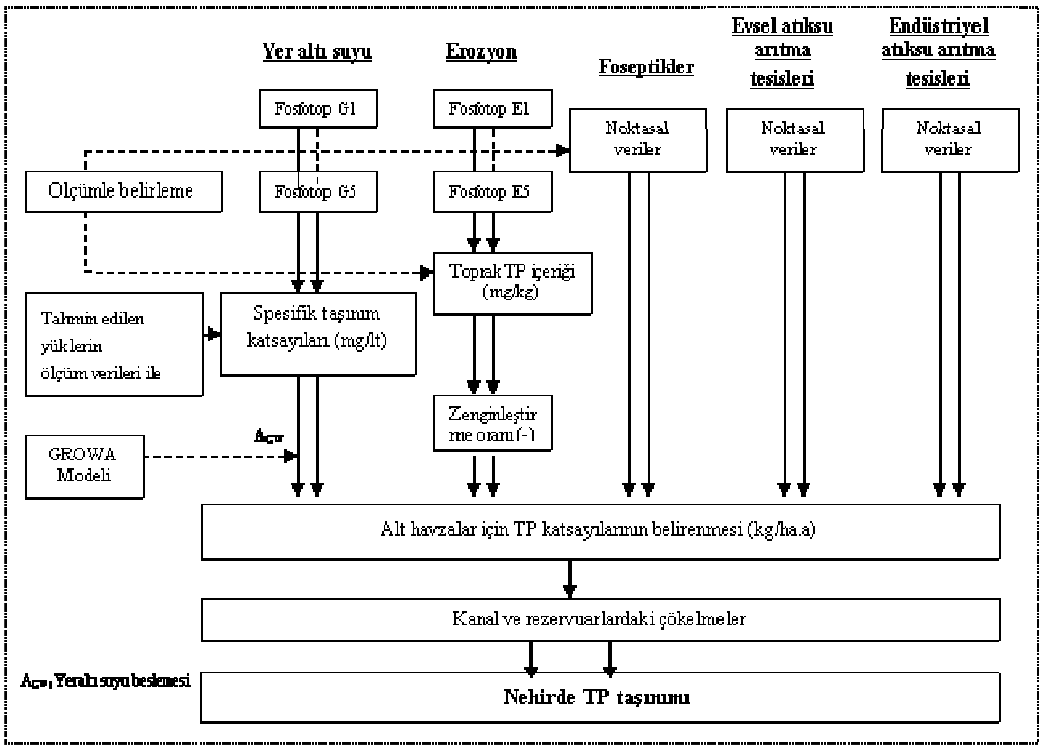
Tablo 4.3: Ölçülen TF konsantrasyonları ve ilgili arazi kullanımı özellikleri.

Arazi kullanımı	Toprak TF İçeriği (mg/kg)
Sulamalı tarım	432,92
Kuru tarım	359,30
Orman	126,50
Fundalık	223,80
Mera	227,53

Tablo 4.3' te tarım alanlarında özellikle de sulu tarım yapılan topraklarda diğer arazi kullanımlarına göre daha yüksek TF içeriği bulunduğu tespit edilmiştir. Mera ve fundalık alanlardaki ortalama TF içeriğinin orman alanlarındaki TF içeriğinden nispeten yüksek olması burada otlatmak amacıyla bulunan hayvanlardan kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

Ölçümlerle belirlenen TF konsantrasyonları havzadaki diğer tarım alanlarına enterpolasyon yoluyla yaygınlaştırılarak erozyon kaynaklı TF yükünün belirlenmesinde gerekli olan üst toprak TF içeriği tüm havza için belirlenmiştir.

Bu aşamanın ardından havzaya uygulanacak olam MEPhos modelinin gerekli modifikasyonları tamamlanmıştır. MEPhos modelinin akış şeması [Tetzlaff and Wendland, 2007] Türkiye şartlarına uyarlanmış şekliyle Şekil 4.5' de verilmektedir.



Şekil 4.5: MEPhos modelinin akış şeması.

4.3. Model İçin Gerekli Veriler

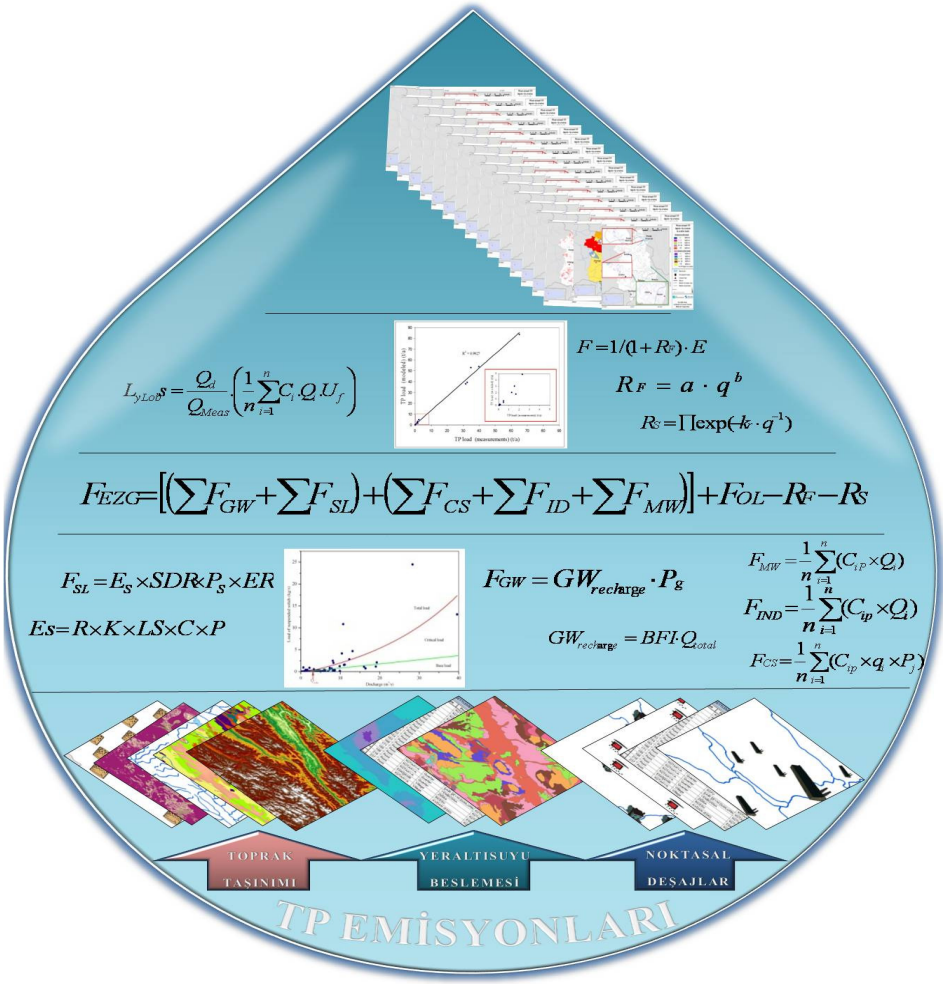
MEPhos modeli ve entegre edilen GROWA modeli için gerekli veriler uygulama ve validasyon amacıyla kullanılan veriler olmak üzere iki bölüme ayrılabilir.

Bir su bütçesi modeli olan GROWA için öncelikli olan meteorolojik verilerdir. Bunlar günlük bazda istasyonlarda ölçülen yağış, buharlaşma verileri veya dijital haritalar şeklinde olabilir. Meteorolojik verilere ait dijital haritaların bulunmaması durumunda istasyonların koordinat ve yükseklik bilgileri model için gereklidir. Toprak türü, arazi kullanımı, hidrojeolojik yapı ve arazi topoğrafyası gibi uygulamada gerekli olan diğer verilerin de dijital haritalar şeklinde hazırlanması gerekmektedir. Bu verilerin dijital olarak bulunmaması halinde çeşitli yöntemlerle sayısallaştırılmaları gerekmektedir. Modelin uygulanabilir olması için genel bir sınırlama verilmemiş olmakla birlikte 100 x 100 m ve daha yüksek çözünürlükler önerilir. Ayrıca GROWA modelinin uygulanması için model tarafından hesaplanan ve topağın yapısına göre değişen, bitki kök derinliği, etkin su

tutma kapasitesi, yeraltı suyu yükselmesi gibi bir seri toprak parametresinin de modelleme aşamasında belirlenmesi gerekmektedir.

Sayısal arazi modeli, toprak haritası, arazi kullanımı verisi GROWA'da olduğu gibi MEPhos modelinin uygulamasında da gerekli verilerdir. Bunun yanı sıra dijital toprak taşanımı haritası, nehir ağı haritası, GROWA modelinin çıktısı olan yeraltı suyu deşarjı haritası ve üst toprak TF içeriği haritalar şeklinde modele sunulan diğer verilerdir. Bunun yanı sıra noktasal TF girişlerini temsil eden endüstriyel ve evsel atıksu deşarj noktalarının koordinat bilgileri ile bunlara ait kirletici parametre (TF) ve deşarj debisi verileri MEPhos modeline girilmesi gereken verilerdir. Akarsu su kalite gözlem istasyonlarındaki sediment ölçümü verileri ER değerinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer veri setidir.

GROWA modelinin validasyonu için akarsu gözlem istasyonlarının günlük akım değerleri ve koordinat bilgileri kullanılmaktadır. Günlük akarsu debisi verileri MEPhos modelinin validayonu için de kullanılmakla birlikte akarsuların su kalitesi gözlem istasyonların da ölçülen TF parametresi ve anlık debi değerleri ve koordinat bilgileri de validasyon aşamasında kullanılan verilerdir. Şekil 4.6' de MEPhos modelinin uygulama aşamalarında kullanılan veri setleri ile formülasyonları içeren bir grafik verilmektedir.



Şekil 4.6: MEPhos modeli uygulama aşamaları.

Şekilden de anlaşılacağı gibi MEPhos modelinin uygulama aşamasının son basamağını kullanıcıların karar verme süreçlerinde değerlendirebileceği harita üretimi oluşturmaktadır.

5. MODELİN UYGULANMASI

5.1. Porsuk Havzası

Tez çalışması kapsamında modifiye edilen MEPhos modelinin uygulama alanı olarak Sakarya Nehri'nin bir kolu olan Porsuk Nehri'nin Baraj Gölü Havzası seçilmiştir. Bunun en önemli sebebi aynı havzada Azot kirliliğinin araştırılmasına yönelik bir TUBİTAK projesinin 2007 yılı sonunda tamamlanmış olmasıdır. Türk-Alman ortak çalışması olan bu projede iklim, hidroloji, toprak, hidrojeolji, topoğrafya ve arazi kullanım verileri gibi model giriş verilerinin sağlanması için önemli bir çaba sarf edilmiştir. Çeşitli devlet kuruluşlarında bulunan ve çoğunluğu kağıt ortamında olan bu veriler tüm havza için modellemeye uygun giriş verisi haline getirilmiştir. Böylece burada amaçlanan çalışmaya uygun, tematik ve coğrafik olarak kapsamlı dijital veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri seti fosfatın yüzeysel sulara giriş yollarının belirlenmesinde olduğu gibi yayılı ve noktasal kaynaklardan gelen fosfat kirliliğinin ele alınabilmesi için de gerekli disiplinler arası bir veri setidir. Bu veri setinin bulunması proje için oldukça önemlidir. Bu verilerin elde bulunması çalışma alanında uygulanacak ileri düzeyde hidrolojik çalışmalar için bilgiler ihtiva etmektedir. Diğer taraftan bu veriler alt havzalardaki noktasal kaynakların belirlenmesi için de kullanılabilecek bilgileri içermektedir. Ayrıca yayılı kaynaklarla gelen TF ile ilgili model sonuçları havzadaki çalışılacak alt havzaların ve arazi çalışmalarının belirlenmesi için ideal bir başlangıç noktası olacaktır. Fosfor kirliliği konusunda yapılan bu tez çalışmasının önceki çalışmayı besi maddesi kirliliği açısından tamamlayıcı olması hedeflenmiştir. Bununla birlikte Eskişehir ve Kütahya gibi iki şehre içme ve kullanma suyu temin edilen Porsuk Barajı'nın, beslenme havzasının yaklaşık % 48' nin tarım alanı olarak kullanılması ve Seyitömer ile Tügsaş Azot Fabrikası gibi önemli endüstri tesislerin bulunması sebebiyle havzasının koruma ve kullanma dengesinin hayati önem taşımaktadır. Bu nedenlerden dolayı modelin Porsuk Baraj gölü havzasına uygulanması uygun görülmüştür.

Tablo 5.1' de MEPhos modeli' nin Porsuk baraj havzasına uygulaması için kullanılan ana veri gurupları ve veri kaynakları ile çözünürlük bilgileri sunulmaktadır.

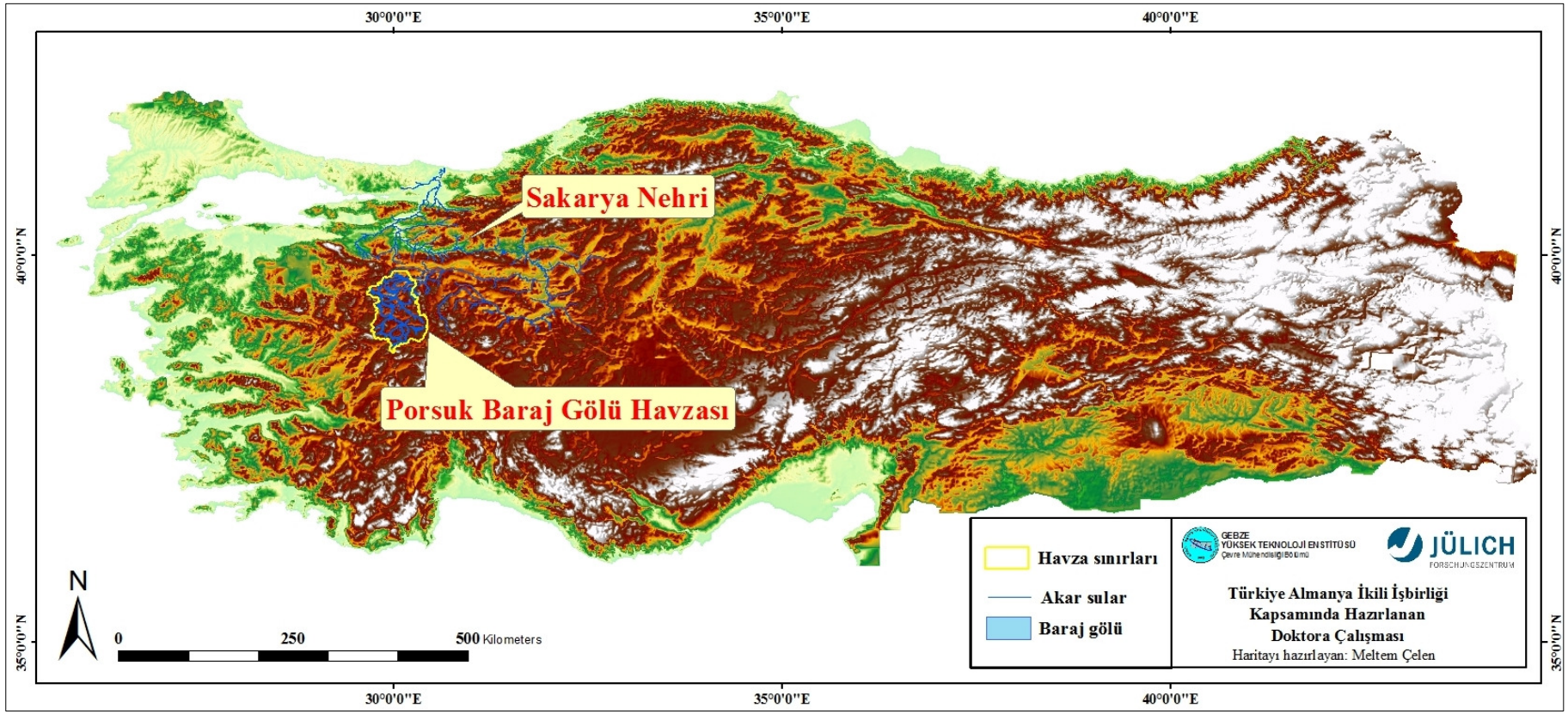
Tablo 5.1: MEPhos modelinin uygulanması için gerekli veriler.

Veri seti	Veri kaynağı	Alansal Çözünürlük	Zaman aralığı ve çözünürlük
Sayısal Yükseklik Modeli	Çevre ve Orman Bakanlığı (ÇOB) Arc GIS 9.2 kullanılarak üretildi	100.100 m² 30.30 m²	2006 2011
Arazi kullanımı	CORINE 2006 (ÇOB)	1:25 000	2006
Soil Erosion Map	ÇOB	(Grid veri, 10.10m²)	2012
Yıllık ortalama yeraltı suyu beslemesi	GROWA su bütçesi modeli	(Grid veri, 100.100m²)	2004
Nehir ağı	ÇOB	1:25 000	2004
Akım gözlem istasyonu verileri	Devlet Su İşleri (DSİ) istasyonları	İstasyon verisi	2007-2011, günlük
Surface water quality data	Devlet Su İşleri (DSİ) istasyonları	İstasyon verisi	2007-2011, her istasyon için yılda 2-6 arasında değişmekte
Evsel atıksu arıtma tesis TF konsantrasyonları ve atıksu debi değerleri	Kütahya Belediyesi	Noktasal veri	2007-2011, haftalık
Endüstriyel atıksu arıtma tesis TF konsantrasyonları ve atıksu debi değerleri	ÇOB ve literatür verileri	Noktasal veri	2007-2011, yıllık
Foseptik TF konsantrasyonu değerleri	Arazi gezisi ile yapılan ölçümler	Noktasal veri	July 2011, bir arazi gezisi
Üst toprak TF içeriği	Arazi gezisi ile yapılan ölçümler	-	2011, Nisan, Temmuz, Ekim

5.1.1. Havzanın Konumu ve Özellikleri

Türkiye'nin batı Anadolu bölümünde bulunan Sakarya nehrinin Porsuk Baraj gölü havzası yaklaşık 5000 km^2'lik bir alanı kaplamaktadır. (Şeki 5.1). Porsuk Baraj Gölü, Porsuk Çayı üzerine kurulmuştur. Yüksekliği 49,70 m, su depolama hacmi 525.000.000 m^3'tür. Genel olarak bakıldığında kuzeyde Sündiken Dağları, Güneyde Türkmen Dağları, Güney-Doğuda ise Murat dağları havzayı sınırlandıran önemli yükseltilerdir. Murat Dağlarından gelen Kocaçay, Avşar Deresi, Kokarçay ve Kureyşler Derelerinin Altıntaş İlçesi Eymir Köyü yakınlarında 1010 m kotunda birleşmesiyle Porsuk Çayı oluşmaktadır.

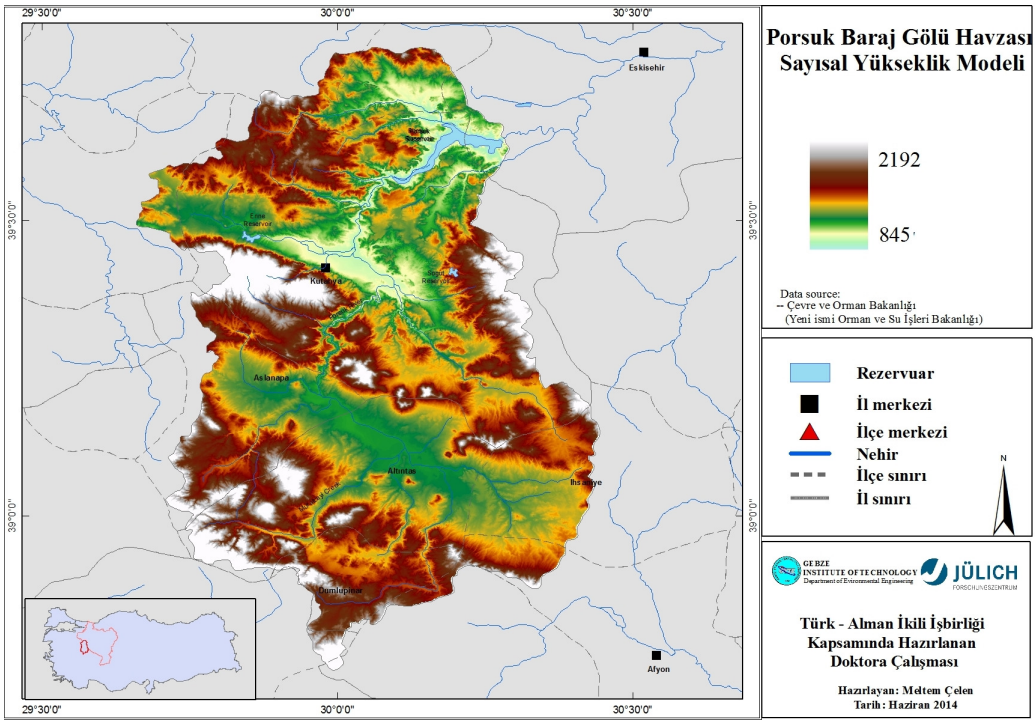
Porsuk barajı Kütahya ve Eskişehir İlleri için önemli bir su kaynağı durumundadır. Nehir sulama, rekreasyon ve endüstriyel amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Buna rağmen Kütahya İlinin batısından gelen Porsuk çayı bölgede bulunan endüstri tesisleri için atıksuların deşarj edildiği bir alıcı su ortamı durumundadır. Türkiye İstatistik Kurumunun 2010 yılı verilerine göre havzadaki toplam nüfus 310.591 kişidir. Havzadaki en önemli yerleşim merkezi Kütahya İli olup merkez nüfusu 235.685 kişidir. Döğer, Altintaş ve İhsaniye diğer önemli nüfusa sahip yerleşim yerleri olup nüfusları sırasıyla 5388, 5306 ve 2292 kişidir. Havzadaki köy yerleşimi sayısı ise 209 dur.



Şekil 5.1: Çalışma Alanının Konumu.

5.1.2. Topografya

Havzanın topoğrafik özelliklerinin belirlenmesinde 85x85 m çözünürlüğünde bir sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır. Porsuk baraj havzasının yükseltisi 100 - 1600 m arasında değişmektedir (Şekil 5.2). En yüksek değerler havzanın güney batı kesimleri ile Kütahya'nın kuzeyinde görülmektedir. Bununla birlikte havzanın kuzey doğusu ile orta bölgelerinde de yükseklikler 1110 - 1130 m arasında değişmektedir. Daha düşük değerler (1000 - 1100 m) havzanın kuzey ve güneyinde nehir kolları boyunca görülmektedir. Nispeten düşük kota sahip alanlar genellikle havzanın kuzeyinde bulunmaktadır.

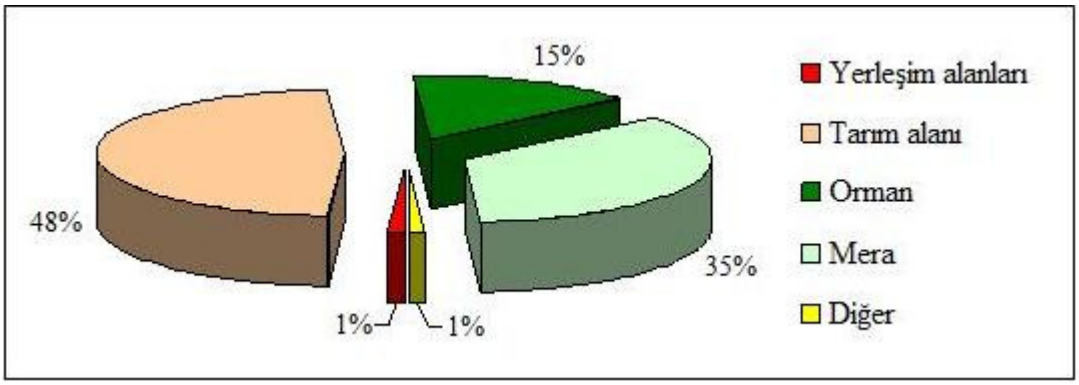


Şekil 5.2: Porsuk baraj havzası topografya haritası.

5.1.3. Arazi Kullanımı

Tarım alanları erozyonun en yoğun olduğu arazi kullanımı olması sebebiyle yayılı TF yükü modellemesinde bu alanların belirlenmesi önemlidir. Bu amaçla modelde CORINE 2006 arazi kullanım verisi kullanılmıştır. Buna göre havzada 23 farklı arazi kullanım türü bulunmaktadır. Havzadaki arazi kullanım gruplarının dağılımı Şekil 5.3' de verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi havzanın yarısı (%

46) tarım alanlarından oluşmaktadır. Meralar ikinci büyük arazi kullanım grubunu oluşturmakta ve 1783 km²' lik bir alan kaplamakta (% 35). Orman alanları ise havzanın % 15'ini oluşturmaktadır. Yerleşim, ticaret ve endüstriyel alanlar gibi yapılaşmanın bulunduğu bölgeler ise yaklaşık % 1 düzeyindedir.

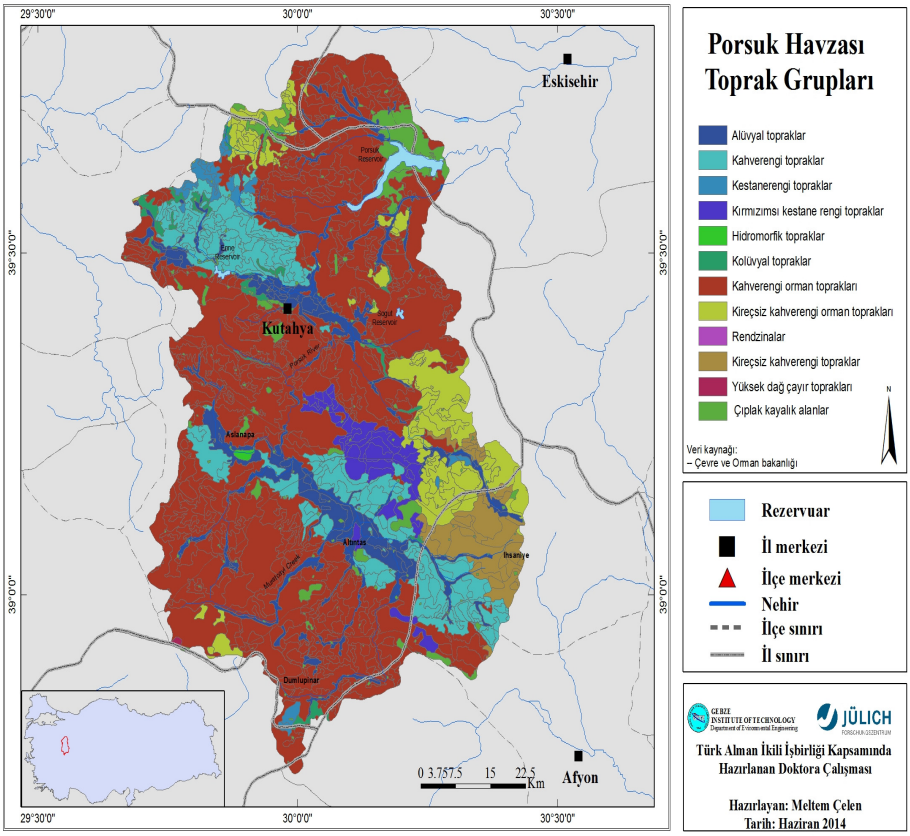


Şekil 5.3: Porsuk havzası arazi kullanım gruplarının dağılımı.

Porsuk havzasının tarımsal sulama amaçlı kullanılması sebebiyle sulamalı tarım alanları havzanın güneyinde ve Kütahya'nın kuzeyindeki nehir kenarlarında yer almaktadır.

5.1.4. Toprak Özellikleri

Bütün toprak verileri 1:25 000 ölçekli ulusal toprak haritasından üretilmiştir (Şekil 5.4). Kahverengi orman toprakları havzada % 58'lik bir yüzdeye sahiptir İkinci büyük toprak grubu, genel olarak Felent çayının kuzeyinde bazı bölgelerde bulunan, kahverengi topraklardır (%12). Aluvyal topraklar (%9) çoğunlukla nehir kıyısı boyunca uzanmaktadır. Kireçsiz kahverengi orman toprakları % 8'lik bir orana sahiptir ve nispeten yüksek alanlarda bulunmaktadır. Kireçsiz kahverengi topraklar (%4) genellikle havzanın güney doğu kesimlerinde bulunmaktadır. Kestane rengi topraklar havzanın orta kesimlerinde yer alır ve %3'lük orana sahiptir. Kolüvyal topraklar (% 1), kestane rengi topraklar (% 1), hidromorfik topraklar (% 0,1) ve yüksek dağ toprakları (%0,05) düşük değerlere sahiptir.



Şekil 5.4: Porsuk havzası toprak grupları.

5.2. Verilerin Model için Analiz Edilmesi ve Model Uygulama

5.2.1. Endüstriyel Kirletici Kaynaklar

Havzadaki TF kirliliği açısından önemli endüstriyel kaynakların tespit edilebilmesi amacıyla bir envanter çalışması yapılmıştır. Bu amaçla Kütahya İl Çevre Müdürlülüğü ve Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı ile görüşülmüş ve tespit edilen endüstriler ile ilgili bilgiler derlenmiştir. Buna göre havzada atıksularını porsuk nehrine boşaltan 7 önemli endüstriyel tesis bulunmaktadır. Bunlardan biri soğutma sularını Porsuk nehri kollarına deşarj eden ve Kütahya İlinin Kuzeyinde yer alan Seyitömer Termik Santralidir. İki porselen fabrikası bir azot gübre fabrikası ve iki süt ürünleri fabrikası Kütahya – Eskişehir karayolu üzerinde bulunmaktadır. Azot fabrikası dışındaki diğer fabrikaların atıksu arıtma tesisleri bulunmaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan bu fabrikalar atıksu deşarjlarının miktarı ve parametreler konusunda bilgi paylaşımında bulunmak istemediklerinden literatürdeki

benzer fabrikaların bilgileri kullanılarak ve Mülga Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından sağlanan bilgiler kullanılarak model için gerekli veriler elde edilmiştir. Tablo 5.2' de havzada bulunan önemli endüstrileri sektörlerinin literatürde verilen TF konsantrasyonu değerleri verilmektedir.

Tablo 5.2: Havzada bulunan önemli sektörlerin tipik atıksu deşarjlarında bulunabilecek TF konsantrasyonu değerleri.

Sektör adı	TF (mg/l)
Termik santral (soğutma suyu)	0.225 [Özyurt et al., 2004]
Mandıra	8-68 [Demirel et al., 2005]
Seramik	0.05-1 [Dinçer and Kargı, 2000]
Gübre fabrikası	1.4 [Muhammetoğlu et al., 2005]

Havzada bulunan endüstrilerin Mülga Çevre ve Orman Bakanlığından alınan atıksu deşarjı değerleri ise Tablo 5.3' de sunulmaktadır.

Tablo 5.3: Porsuk havzasında bulunan bazı önemli endüstrilerin sektör isimleri ve atıksu deşarj bilgileri.

Sektör	Deşarj debisi (m^3/day)	Arıtım bilgisi ve deşarj noktası
Seramik, porselen	700 - 2820	Arıtılmış, Porsuk nehri
Seramik, porselen	600	Arıtılmış, Porsuk nehri
Süt-Gıda	50	Arıtılmış, Porsuk nehri
Paket	70	Arıtılmış, Porsuk nehri
Mandıra	20	Arıtılmış, Porsuk nehri
Mandıra	30	Arıtılmış, Porsuk nehri
Azot fabrikası	6500	Arıtma yok Porsuk nehri
Magnezit	2819	Ön arıtım ve Tekrar kullanım
Termik santral	3750	Arıtma yok Porsuk nehri

Bu sektörlerin yanı sıra havzanın çeşitli bölgelerinde işletilen un fabrikaları da bulunmaktadır. Böyle bir işletme sahibi ile yapılan görüşmede tesislerin genellikle kuru temizleme teknikleri kullandıkları bu nedenle önemli bir atıksu oluşumu bulunmadığı belirtilmiştir.

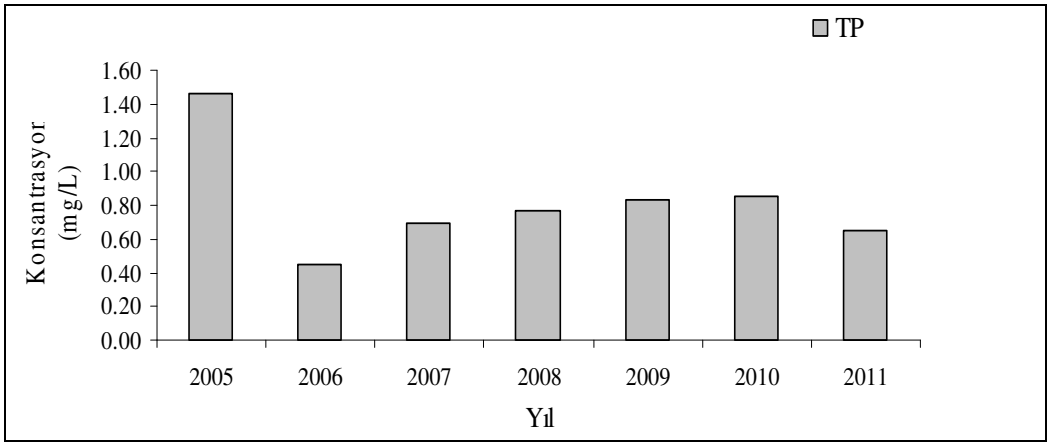
5.2.2. Kütahya Atıksu Arıtma Tesisi

Havzada bulunan en önemli evsel TF kirletici kaynağı Kütahya AAT'sinin deşarjıdır. Belediye yetkilileri ile yapılan görüşmede şehrin herhangi bir ayrık yağmur suyu toplama sisteminin bulunmadığı belirtilmiştir. Havzada bir atıksu arıtma sistemi bulunan tek yerleşim yeri Kütahya İli olup sadece bu yerleşimin atıksu deşarjı düzenli olarak izlemektedir.

Tesisle ilgili bilgiler ve 2005 - 2011 yılları arasındaki atıksu deşarjı ile ilgili veriler Kütahya Belediyesi tarafından sağlanmıştır. Buna göre Kütahya şehri 2011 yılında yaklaşık 800 km uzunluğunda bir atıksu kanalına sahip olup buna her yıl ortalama 25 km eklenmektedir. Tesise atıksu taşıyan ana atıksu kanalı 1400 - 1200 mm çapındadır. Kente sonradan bağlanan bazı köyler mahaller statüsünde olup atıksu kanalı bulunmamakta atıksular foseptiklerde biriktirilmektedir. Tüm kentte 2011 yılında atıksu kanalına bağlı bulunan yerleşimlerin oranı yaklaşık % 80 iken şehir merkezinde bu oran % 100'dür.

Arıtma tesisi ilk olarak 1985 yılında İller bankası tarafından klasik aktif çamur yöntemi göz önünde bulundurularak projelendirilmiştir. Bu projede 3,5 m su derinliği ve yüzeysel havalandırma sistemi seçilmiştir. Azot ve fosfor giderimi konusunda ayrıca bir uygulama yapılmamıştır. Ek olarak çamur arıtımında anaerobik arıtma sitemi öngörülmüştür. Uygulama sırasında bu yaklaşımın Kütahya'nın iklim şartları için uygun olmadığı görülmüştür. 2004 ve 2005 yıllarında ön çökeltim havuzu fosfor arıtımı yapılmak üzere dönüştürülmüş ve % 84 giderme verimi elde edilmiştir. Havalandırma tanklarında da blower-diffuser sistemine geçilmiştir. Tanklar beton duvarlarla ayrılarak seri bağlı iki tank elde edilmiş ve böylece aerobik ve anaerobik alanların oluşturulduğu uzun havalandırmalı tanklara dönüşümü sağlanmıştır. Bununla birlikte tesisi tasarımının başlangıçta aktif çamur sistemine göre yapılması nedeniyle şu anki hacim yetersiz kalmaktadır. Nitrifikasyon ve denitrifikasyonun yeterli düzeyde gerçekleşmemesi nedeniyle azot giderim verimi

%50 düzeyinde kalmıştır. Arıtma tesisinden deşarj edilen TF konsantrasyonu değişimi Şekil 5.5' te verilmektedir.



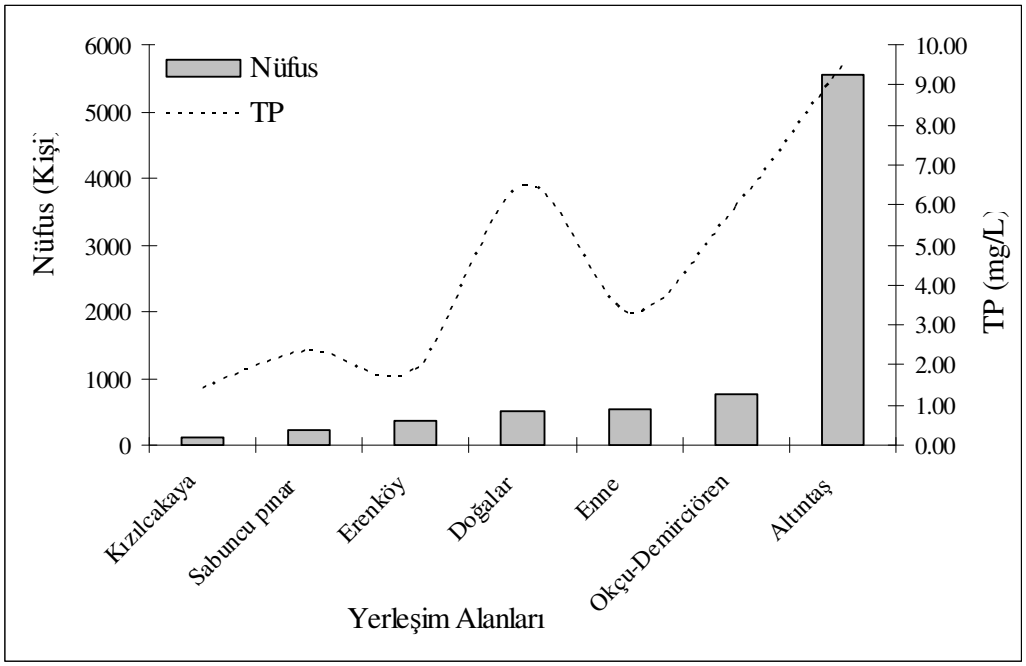
Şekil 5.5: Kütahya atıksu arıtma tesisi TF konsantrasyonu değişim grafiği.

Şekil 5.5'ten de görüldüğü gibi arıtma tesisinin TF deşarj değerleri 2007 – 2011 yılları arasında stabil bir durum sergilemektedir. Bu durum model uygulama aralığının seçiminde belirleyici olmuş ve 2007 – 2011 periyodu model periyodu olarak seçilmiştir.

5.2.3. Foseptikler

Havzada Kütahya İli dışındaki diğer yerleşimlerin hemen hepsinde atıksu uzaklaştırma sistemi olarak çürütme çukurları olarak tasarlanmış foseptik sistemi kullanılmaktadır. Modele bu sistemlerin girişinin yapılabilmesi amacıyla yerleşim yerlerinin koordinatları tek tek belirlenmiş ve GIS sisteminde haritalandırılmıştır. Foseptiklerin kapasite ve arıtma düzeyleri ile ilgili ayrıntılı bilgi Kütahya İl Özel İdaresi yetkililerinden, havzadaki Afyon İline ait yerleşim yerlerinin bilgileri ise İhsaniye Belediyesi yetkileri ile yapılan yazışmalarla ve İl Özel İdaresi internet sitesinden temin edilmiştir. Buna göre havzadaki 201 köy yerleşiminden 27 tanesinin foseptik sistemi bulunmamaktadır. Bunlardan Merkez ve Altıntaş İlçelerine bağlı 7 köy yerleşimi gerek bir su havzasında bulunması gerekse topografyasının uygun olmaması sebebiyle merkezi bir foseptik sisteme sahip değildir. Buralarda evlerde bulunan tekil foseptik çukurlar mevcuttur. Diğer yerler için ise gelecek önemlerde foseptik yapılacağı bildirilmiştir.

MEPhos modeline foseptiklerle ilgili bir modülün entegre edilebilmesi amacıyla havzadaki seçilen foseptiklerde TF konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır (Bölüm 4.2.1). Buna göre tespit edilen TF konsantrasyonu değerleri ile ilgili yerleşim yerlerinin nüfus değerlerini gösteren grafik Şekil 5.6' da sunulmuştur.

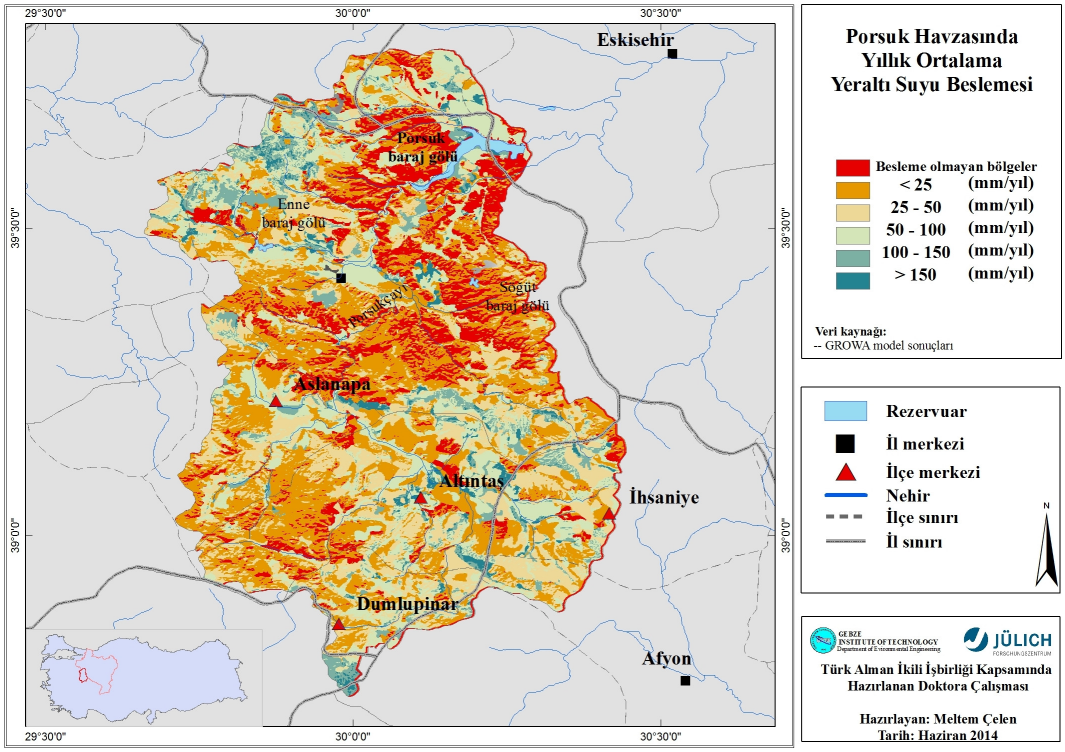


Şekil 5.6: Foseptiklerde ölçülen TF konsantrasyonları ve bağlı yerleşimlerdeki nüfuslar.

5.2.4. Yeraltısuyu Deşarjı

Yeraltısuyu deşarjından kaynaklı TF yüklerinin hesaplanabilmesi için su bütçesi modeli ile hesaplanan yıllık ortalama deşarjı verisi gereklidir. Porsuk baraj gölü havzası için GROWA modeli kullanılarak elde edilen yeraltı suyu deşarj haritası Şekil 5.7' de sunulmaktadır. Şekilden de anlaşabileceği gibi yeraltısuyu deşarj değerleri havza genelinde farklılıklar göstermektedir. Baraj gölünün güneyi ile havzanın güney batı bölümlerinde değerler 25 mm/yıl'dan daha düşük seviyededir. Havzanın güney doğu ve kuzey batı bölümlerinde ise değerler 25 – 150 mm/yıl arasında değişmektedir. Bu durum bölgedeki hidrojeolojik yapı ile açıklanabilmektedir. Havzanın bu bölümünde tersiyer ve miyosen dönemi marn, kireç taşı, kumtaşı, klastik ve karbonat kayaçları yer almaktadır. Nehir yatağı

boyunca ve alüvyonla kaplı alanlarda 100 mm/yıl'dan yüksek değerler görülmektedir.



Şekil 5.7: Porsuk baraj gölü havzası yıllık ortalama yeraltı suyu deşarjı haritası.

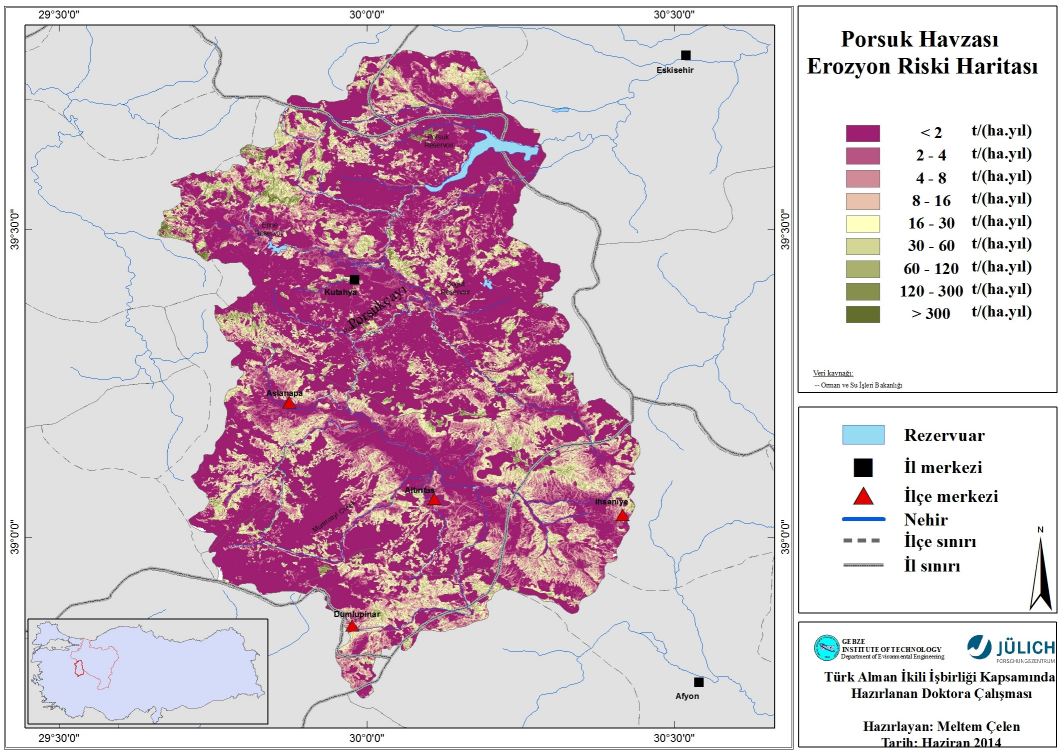
Yeraltı suyundan kaynaklı TF yükü hesabında dijital Türkiye jeoloji haritası kullanılmıştır. Buna göre havzadaki ana kayaç türlerinin ve ilgili yeraltı suyunda bulunan fosfat fosforu (PO_4-P) konsantrasyon bilgilerinin modele girildiği tablonun bir görüntüsü Şekil 5.8'de sunulmuştur.

Geological Formation	Startigraph	Area m2	PO4 mg/L	N	4 mg/L-% 10 İSTATİSTİ	PO4 mg/L-% 50 İSTATİSTİĞİ	PO4 mg/L-% 90 İSTATİSTİĞİ
alluvial fan, slope debris, moraine etc.	quaternary	2344644.766	0.12	138.00	0.001	0.001	0.200
alluvium	quaternary	487485256.7	0.08	918.00	0.001	0.060	0.400
andesite	middle miocene	3476812.537	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
andesite		25386156.19	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
basalt	pliocene quaternary	55642502.9	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
basalt spilite	upper cretaceous	11286795.11	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
cherty marble	middle jurassic - cretaceous	332729.473	0.14	60.00	0.002	0.020	0.060
clastic and carbonate rocks	miocene	32298621.9	0.06	183.00	0.001	0.020	0.300
clay,sand,gravel	quaternary	119846398.8	0.06	183.00	0.001	0.020	0.300
clay,sand,gravel,conglomerate	tertiary - pliocene	232401327.8	0.06	183.00	0.001	0.020	0.300
conglomerate, sandstone	tertiary	38020749.45	0.06	183.00	0.001	0.020	0.300
continental clastic rocks	tertiary - miocene	244203609.8	0.06	183.00	0.001	0.020	0.300
crystallized limestone	paleozoic	161295140.9	0.32	11.00	0.001	0.040	0.320
gneiss	precambrian and/or palaeozoic	4330918.431	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
Granite		261874.377	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
lacustrine cabonate rocks	tertiary - miocene	5071177.315	0.21	159.00	0.001	0.020	0.170
lacustrine limestone, mam, shale	tertiary - miocene	172482226.2	0.21	159.00	0.001	0.020	0.170
limestone	cretaceous	71271046.09	0.21	60.00	0.002	0.020	0.060
limestone yellow	tertiary	560088401.2	0.21	159.00	0.001	0.020	0.170
metaclastic and metacarbonate rocks	upper cretaceous		0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
marble	middle triassic-jurassic	8531471.753	0.14 60-27	0.002-0.006	0.02-0.04	0.06-0.12	
marble schist	devonian	278261236.8	0.32	11.00	0.001	0.040	0.320
marble, schist in places	mesozoic	3965274.001	0.32	11.00	0.001	0.040	0.320
marl,limestone,marlylimestone	tertiary	466458627.5	0.21	159.00	0.001	0.020	0.170
marl,marly limestone,limestone,tuffite	tertiary	384240287.3	0.21	159.00	0.001	0.020	0.170
ophiolithic melange	upper cretaceous	40043394.99	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
ophiolitic series		125977869.1	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
peridotite	mesozoic	27900307.39	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
pyroclastic rocks	lower-middle miocene	77903041.48	0.25	19.00	0.001	0.030	0.250
pyroclastic rocks	pliocene quaternary	21984450.15	0.25	19.00	0.001	0.030	0.250
schist series	paleozoic	569658971	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
schist, phylite, marble, metabasic rocks	upper palaeozoic-triassic	4231024.277	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
Schists	upper palaeozoic	1829600.391	0.07	29.00	0.001	0.010	0.100
tuffite		178877631.7	0.25	19.00	0.001	0.030	0.250
undifferentiated basic and ultrabasic rocks	mesozoic	18877946.36	0.05	307.00	0.001	0.020	0.190
undifferentiated quaternary	quaternary	89712749.18	0.08	918.00	0.001	0.060	0.400
undifferentiated volcanic rocks	lower-middle miocene	8535793.623	0.25	19.00	0.001	0.030	0.250

Şeki 5.8: Yeraltısuyundan kaynaklı TF yükü hesabında kullanılan verilerin veri tabanındaki görüntüsü.

5.2.5. Tarım Alanlarından Kaynaklanan Toprak Taşınımı

Bölüm 4.1'de ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi Tarımsal erozyondan kaynaklı TF yüklerinin hesabında en önemli veri erozyon haritasıdır. Orman ve Su işleri Bakanlığı tarafından 2011 yılında üretilen toprak kaybı haritası bu amaçla baz olarak kullanılmıştır. MEPhos modelinde sadece tarım alanlarındaki toprak taşınımı göz önünde bulundurduğundan sadece tarım alanlarını içeren bir erozyon haritası Türkiye erozyon haritası kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 5.9' da Prosuk havzasının geneli için verilen erozyon haritası yer almaktadır. Bu haritaya göre havzadaki yıllık toprak kaybı miktarı ortalama 25,7 t/ha.yıl 'dır.



Şekil 5.9: Porsuk baraj gölü havzası erozyon haritası.

Tablo 5.4'de OECD [OECD, 2001] tarafından Türkiye için verilen indikatör tablosundaki erozyon sınıflamaları verilmektedir.

Tablo 5.4: Su erozyonu için OECD indikatör değerleri.

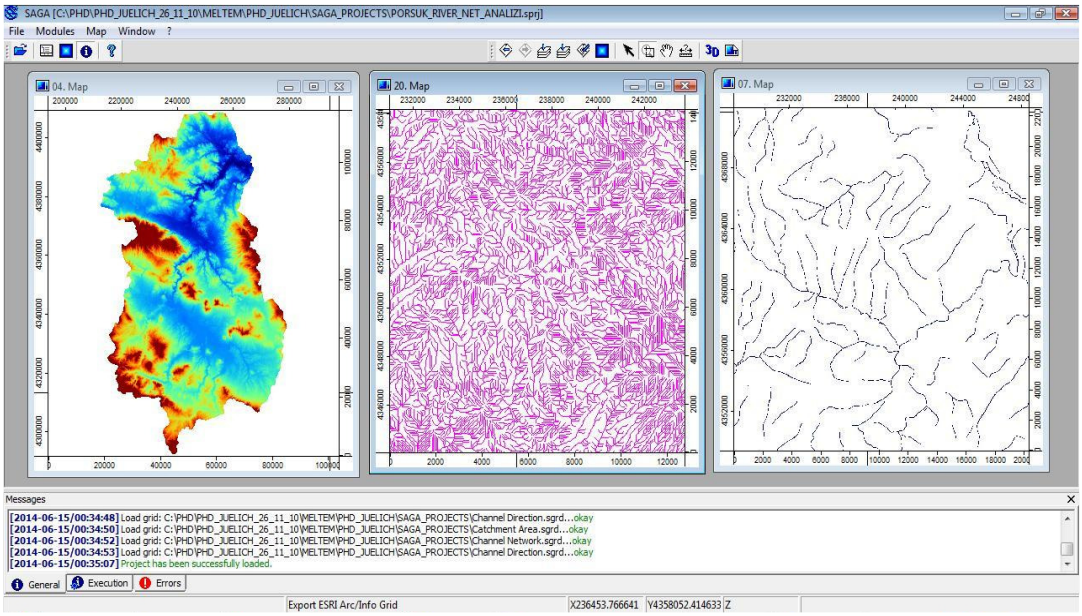
Sınıflandırma	Değer (t/ha.yıl)
İyi düzeyde	< 6,0
Düşük	6,0 - 10,9
Orta	11,0 - 21,9
Yüksek	22,0 - 32,9
Şiddetli	> 33,0

Buna göre Porsuk havzasının yıllık ortalama toprak erozyonu "Yüksek" sınıfında tarım alanları için ise "Şiddetli" sınıfında yer almaktadır.

MEPhos modeli Tarımsal erozyon ile toprak taşınımının eğimin % 3'den fazla olan arazilerde meydana geldiği kabulünü yapmaktadır. Bu nedenle % 3 eğimden fazla olan tarım alanları GIS yardımıyla belirlenerek TF taşınımı için modellenmiştir.

5.2.5.1. TF Taşıma Bölgelerinin Tayin Edilmesi

Erozyona uğrayan bölgelerin belirlenmesinin ardından bir yüzeysel kaynağa ulaşan toprak taşınım bölgelerinin belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla çözünürlüğü yüksek bir SAM kullanılması gerektiğinden eş yükselti eğrilerinden yeni bir 30 m çözünürlüklü SAM oluşturuldu. Bu veri SAGA programında havzadaki ayrıntılı akış kanallını oluşturmak için kullanıldı. İşlem için Eşik derer 250 (25 ha) seçildi. Şekil 5.10'da SAGA programının bir uygulaması görülmektedir. Buna göre SAGA program penceresinin solunda yer alan alt pencerede Porsuk Barajı Havzasısın SAM haritası görülmektedir. Bu veri yardımı ile elde edilen akış kanalları orta pencerede ve büyültülmüş şekli sağ pencerede verilmektedir.



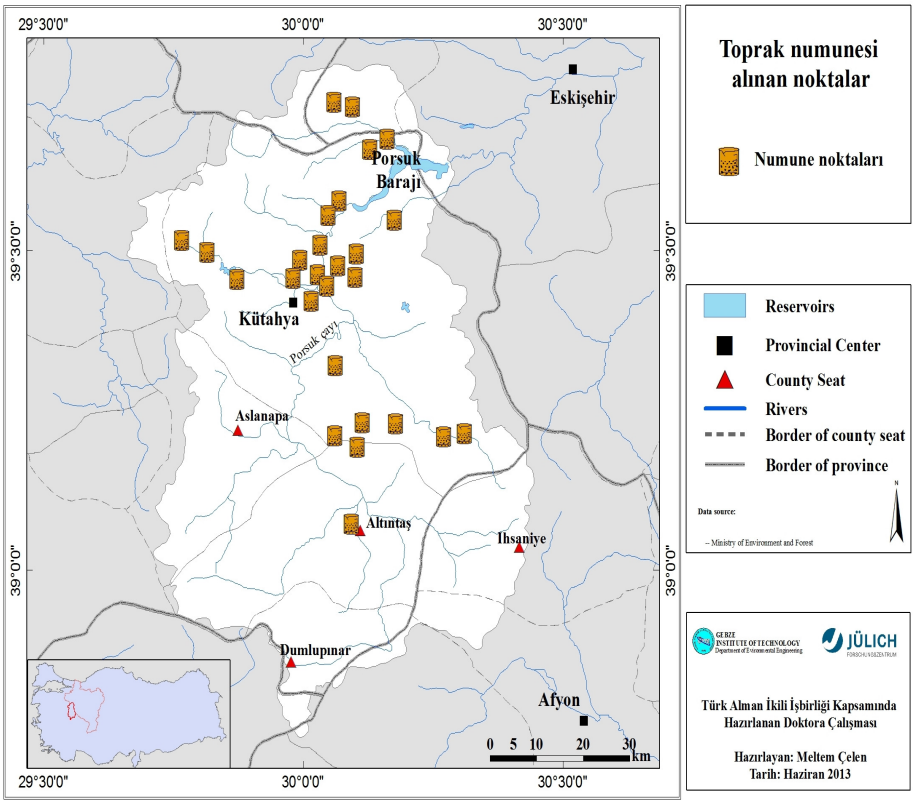
Şekil 5.10: SAGA programı nehir ağı oluşturma analizi.

Elde edilen bu yeni akış kanalları Orman ve Su işleri Bakanlığından temin edilen nehir ağı havzanın rölyef haritası ve ile karşılaştırılarak doğrulaması yapıldı. Bunun ardından kanalların sağ ve sol tarafındaki 30m'lik bölge GIS yazılımında buffer analizi kullanılarak belirlendi. Bu değer MEPhos tarafından iki araştırma

[Sommer and Murschel, 1999], [Fried et al., 2000] baz alınarak önerilmiştir. Böylece tarım alanlarında elde edilen TF taşıma bölgeleri belirlenmiştir.

5.2.5.2. TF Değerlerinin Haritalandırılması

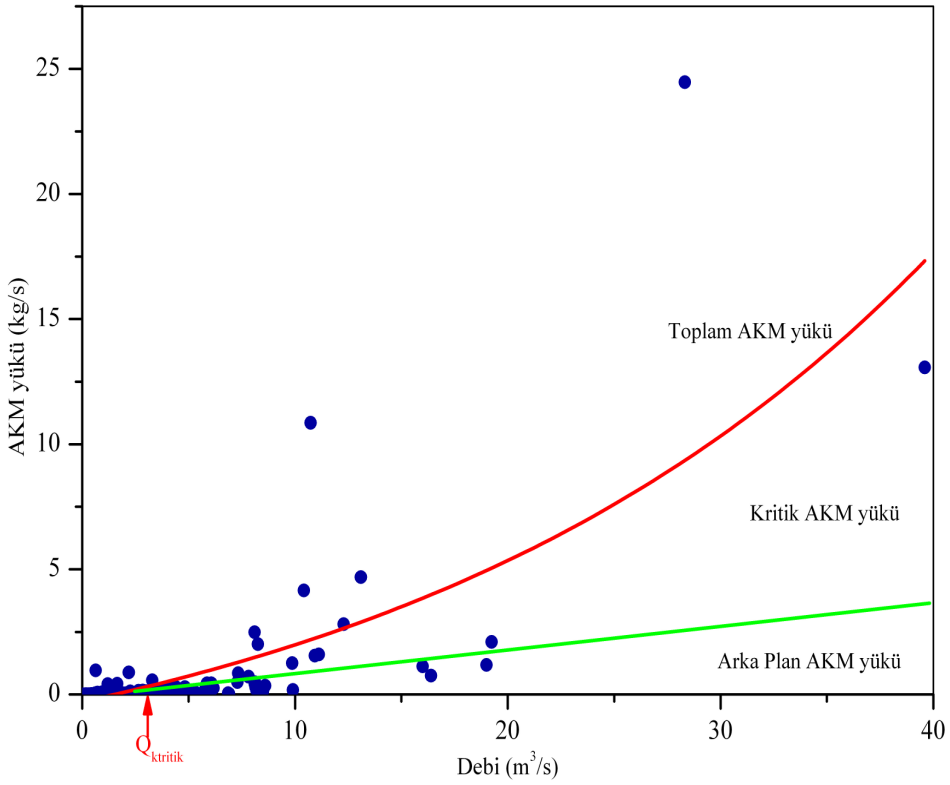
Ayrıntıları Bölüm 4.2.2' de anlatılan üst toprak TF içeriğinin belirlenmesinin ardından bu değerleri havzanın tümüne yayılması amacıyla arazi kullanım haritası toprak haritası kullanılmıştır. CORINE 2006 arazi kullanım verilerine göre tarım alanları sulama durumuna göre sulamalı ve kuru tarım olmak üzere 2 sınıfa ayrılmaktadır. Toprak numuneleri bu sınıflandırma göz önünde bulundurularak alınmış ve arazi kullanım haritasında buna göre atanmıştır. Şekil 5.11'de toprak numunesi alınan yerleşim yerlerinin verildiği bir harita sunulmuştur.



Şekil 5.11: Porsuk havzası toprak numunesi alanları.

5.2.5.3. Erozyonla Taşınan TF Tayin Edilmesi

Bilindiği gibi fosfor erozyonla taşınan küçük toprak parçacıklarına bağlıdır. Bu nedenle aşınan topraktaki TF konsantrasyonu yüzeysel sulara ulaşan sedimentten daha yüksektir. Bu farkı ortaya koymak için bölüm 4.1.1'de ayrıntıları anlatılan yöntem kullanılarak her bir alt havza için Zenginleştirme Oranı tespit edilmiştir. Kokarçay, Ağaçköy, Kureyşler, Azot Fabrikası Öncesi ve Çalca Su kalitesi Gözlem İstasyonlarının temsil ettiği her bir alt için sulamalı tarım alanları ve kuru tarım alanları için ayrı ayrı yapılan analizler neticesinde ortalama ER değeri sırasıyla 1,27 ve 1,78 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.12'de Ağaçköy istasyonuna ait kritik debi ve Askıda Katı Madde (AKM) belirleme grafiği sunulmaktadır.



Şekil 5.12: Ağaçköy havzası Kritik debi ve AKM yükü belirleme grafiği.

Grafik yardımıyla istasyonlarda tespit edilen sediment miktarları kullanılarak yüzeysel sulara ulaşan TF yükleri belirlenmiştir. Bundan sonraki aşamada ise akarsularda meydana gelen çökelmeler belirlenerek hesaplamalar tamamlanmıştır.

5.2.5.4. Akarsularda Meydana Gelen TF Çökelme Değerlerinin Hesaplanması

TF yüklerinin akarsularda çökelme ile meydana gelen kayıplarının hesaplanması amacıyla kullanılan ve Bölüm 4'te verilen eşitlikler için gerekli katsayıların her bir alt havza için tayin edilmesi gerekmektedir. Burada kullanılan a ve b katsayıları alt havzanın alanı ve akarsuyun debisi ile değişen katsayılardır. Bu değerlerin belirlenmesi amacıyla her bir alt havzayı temsil eden akarsu akım gözlem istasyonlarının uzun dönem yıllık ortalama debi değerleri ve ilgili alt havza alanı oranlanarak katsayılar hesaplanmıştır. Bu değerler modelin valide edilmesi işleminde da kullanılmaktadır.

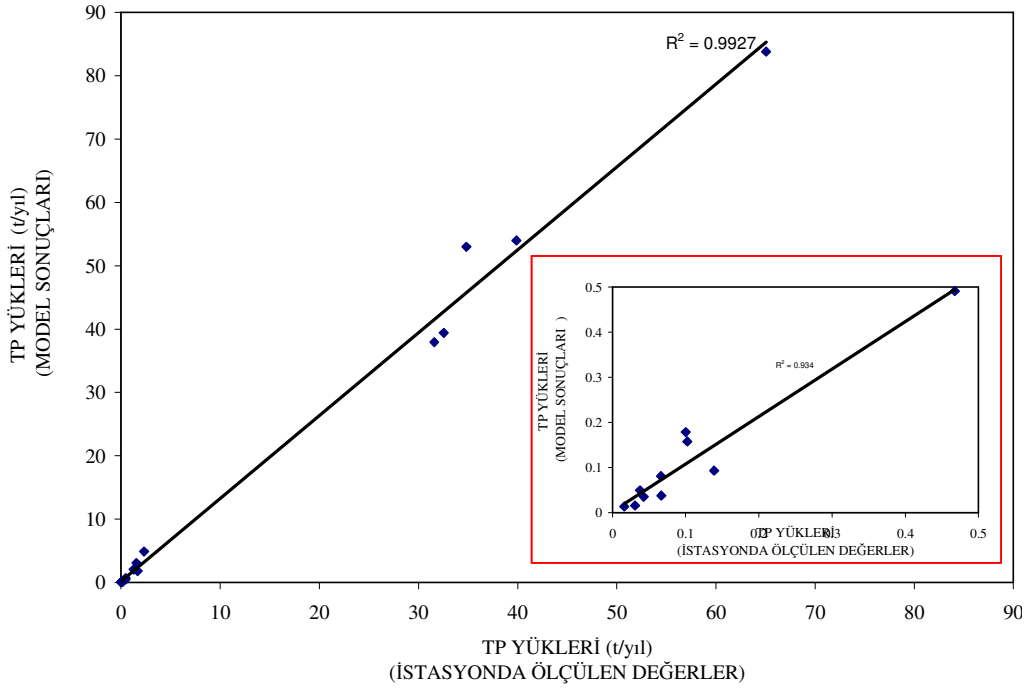
5.3. Model Validasyonu

Model sonuçlarının validasyonu için birbirine kabul edilebilir bir uzaklıktan daha fazla uzakta olmayan akarsu su kalitesi gözlem istasyonları ile akım gözlem istasyonlarında ölçülen veriler kullanılmıştır. Bu özelliği sağlayan 4 istasyon çifti belirlenerek burada ölçülen verilerden elde edilen TF yükleri hesaplanmıştır. Eşitlik 5.1'de verilen yaklaşım en uygun yük hesabı metodu olması sebebiyle MEPhos modelinde önerilmektedir [Venohr et al., 2009].

$$L_{yLob}s = Q_d / Q_{Meas} . \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} C_i . Q_i . U_f \right) \qquad (5.1)$$

Burada; L_{yLob} Yıllık ortalama TF yükü, t/yıl, Q_d Günlük debi, m3/s, Q_{Meas} Günlük debinin yıllık ortalaması, m3/s, C_i Konsantrasyon, mg/l, Q_i Anlık debi, m3/s, U_f İstasyonların farklı yerlerde konumlanması durumunda kullanılan düzeltme katsayısı, *n* ölçüm sayısını ifade etmektedir.

Bahsi geçen dört istasyonda 2007- 2011 yılları için ölçülen veriler derlenerek TF yükleri hesaplanmıştır. Model sonuçları ile ölçüm değerleri arasındaki ilişki kabul edilebilir düzeydedir (Şekil 5.13). Veriler arasında yapılan anlamlılık testine göre değerler belirgin olarak birbirleri ile ilişkilidir (anlamlılık (p) < 0.05).



Şekil 5.13: MEPhos model validasyon grafiği.

Ölçülen ve modellenen TF konsantrasyonları ve akım değerleri ile hata oranları Tablo 5.5'de sunulmuştur. Tablodan da anlaşılacağı gibi yüksek hata oranları İstasyon 1, İstasyon 3 ve İstasyon 4'de görülmektedir.

İstasyon 1'de modellenen yük değerleri yaklaşık 0,06 t/yıl olup havzadaki en düşük değerdir. Bu düşük değerler validasyon aşamasında yüksek hata oranlarına neden olabilmektedir.

İstasyon 3'de Erozyon kaynaklı TF yükleri baskın durumdadır. Sediment iletim oranının tüm Porsuk Havzası için sabit kabul edilmesi buradaki göreceli hatayı doğurmuş olabilir. Çünkü bu alt havza en geniş alanı kaplayan havza özelliğini taşımaktadır.

İstasyon 4 Kütahya Atıksu Arıtma Tesisi'nin bulunduğu bir alt havzayı temsil etmekte bu önemli noktasal TF kaynağının validasyona etkisi de hata oranından anlaşılmaktadır.

İstasyon 2 en düşük hata oranının tespit edildiği alt havzayı temsil etmektedir. Bu istasyonun temsil ettiği alt havza yayılı kirleticilerin yoğunlukta olduğu ve en küçük alana sahip (35 km^2) havza olma özelliğindedir.

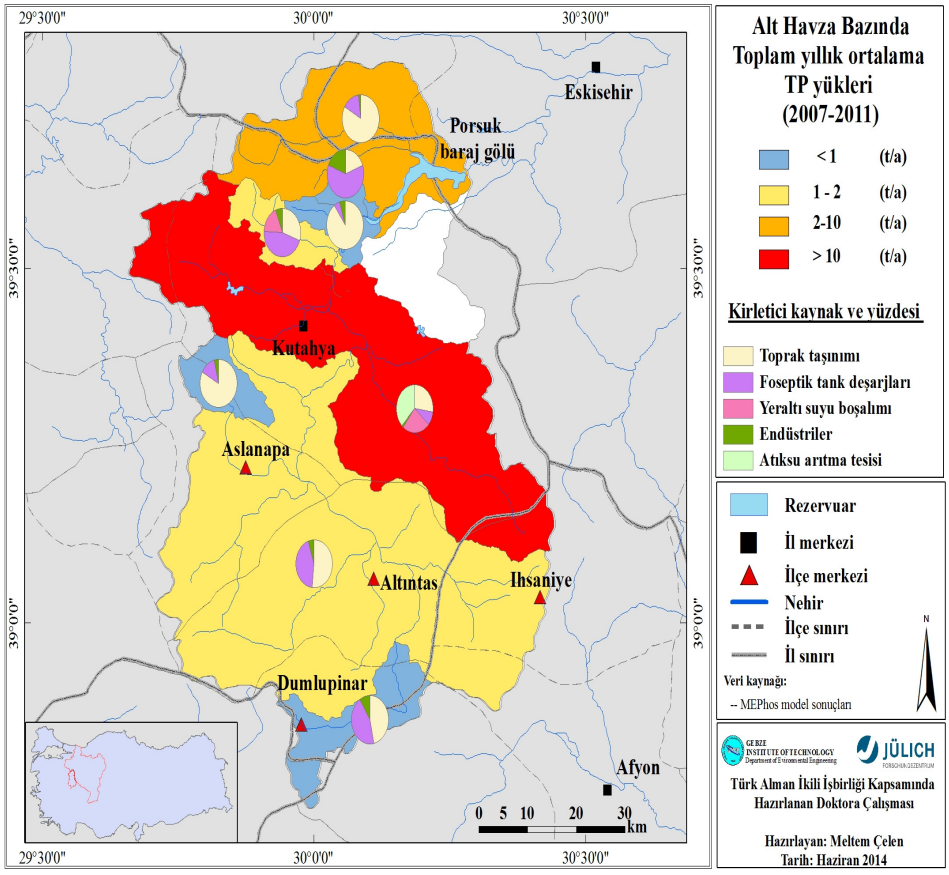
Tablo 5.5: Validasyon için kullanılan veriler ve hesaplanan hata oranları.

Su kalite istasyonları	TF konsantrasyonu mg/l	Akım gözlem istasyonları	Debi (m^3/s)	Ölçülen TF yükü (t/yıl)	Modellenen TF yükü (t/yıl)	Göreceli hata
İstasyon 1	0,003	İstasyon 1	0,70	0,05	0,06	-0,31
İstasyon 2	0,03	İstasyon 2	0,22	0,18	0,15	0,18
İstasyon 3	0,04	İstasyon 3	2,48	2,50	1,45	0,42
İstasyon 4	0,42	İstasyon 4	4,88	53,75	37,57	0,26

6. SONUÇLAR

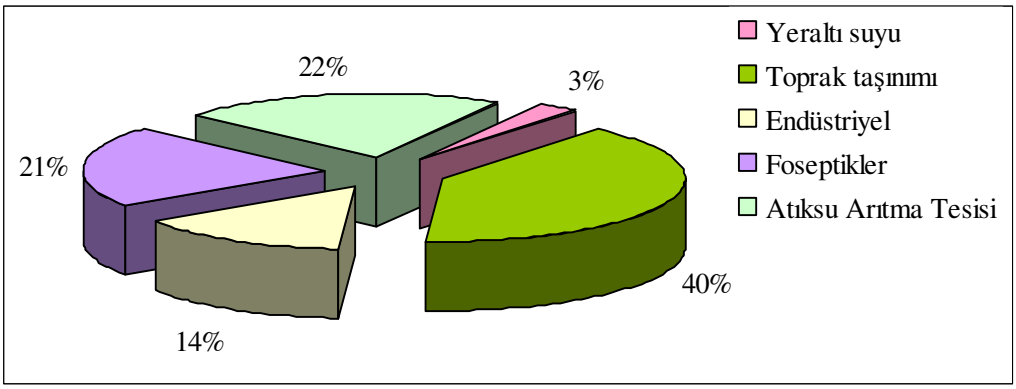
Her bir TF kaynağının modellenmesinin ardından bu değerler alt havza bazında toplanarak model periyodu için (2007–2011) yıllık ortalama toplam yükler hesaplanmıştır. Tüm havza için DSİ su kalitesi istasyonlarının konumlarına göre belirlenen alt havzalar için sonuçlar Şekil 6.1' de verilmektedir. Buna göre havzadaki yıllık ortalama toplam TF yükü değeri 45,97 t/yıl olarak elde edilmiştir. Alt havzalar için hesaplanan TF yükleri 0,06- 40,8 t/yıl arasında değişmektedir.

Kütahya merkezinde bulunan AAT' nin etkisi Şekil 6.1' de açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte diğer alt havzalardaki nüfus yoğunluğunun düşük olması sebebiyle yayılı kaynaklar evsel nitelikli noktasal kaynaklara göre daha baskın durumdadır. Havzanın en kuzeyinde bulunan alt havzada tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri ağırlıklı olarak bulunmaktadır. Bu durum bölgede yaygın olarak yapılan sulamalı ve kuru tarım faaliyetleri ile açıklanabilir.



Şekil 6.1: Porsuk baraj havzasındaki toplam yıllık ortalama yüklerin alt havzalara ve kirletici kaynaklara göre dağılımı.

Havzadaki TF yükünü oluşturan kaynakların toplam yükteki oranları Şekil 6.2'de sunulmaktadır. Buna göre Porsuk baraj havzasında evsel ve endüstriyel noktasal kaynakların % 57 ile toplam yükün yarısından fazlasını oluşturduğu görülmektedir. Bunla birlikte tarım alanlarından kaynaklanan TF yüklerinin (%40) ikinci en önemli kirletici kaynak olduğu görülmektedir. Bu durum yüksek eğime sahip arazilerde yer alan tarım alanları ile açıklanabilir.



Şekil 6.2: Havzadaki TF yüklerinin kirletici kaynak bazında dağılımı.

Havzada sadece bir tane il merkezi ve atıksu arıtma tesisi bulunmasına rağmen bu kaynaktan gelen TF yükleri % 22'lik bir orana sahiptir. Bu değer havza geneline yayılı bulunan foseptiklerden gelen TF yükü (% 21) ile eşit denilebilir. Havzadaki en düşük TF yükü kaynağı beklenildiği gibi yeraltı suyu deşarjıdır (% 3).

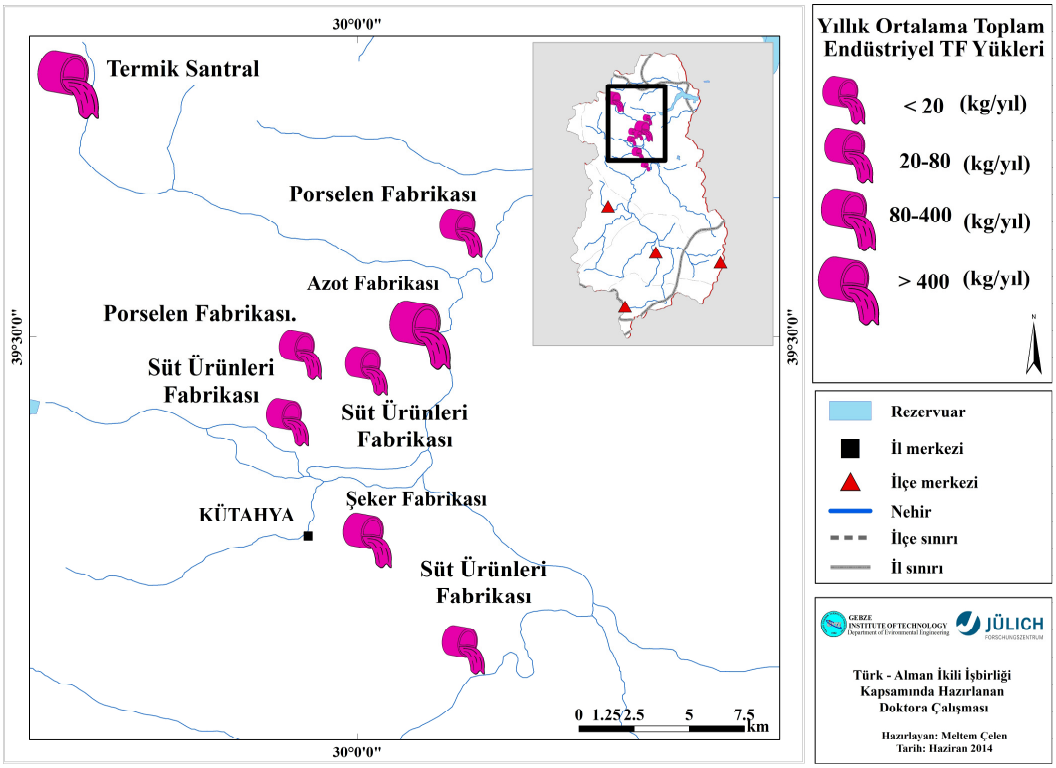
Takip eden bölümlerde noktasal kaynakların ve yeraltı suyu deşarjının neden olduğu TF yükünün model sonuçları tüm havza için verilirken Tarımdan alanlarından kaynaklanan yükler her bir alt havza için ayrı ayrı açıklanmıştır.

6.1. Endüstriyel TF Yükleri

Mülga Çevre ve Orman bakanlığından temin edilen veriler ve literatür verileri kullanılarak her bir endüstriden gelen yükler hesaplanmıştır. Şekil 6.2' den de görüldüğü gibi endüstrilerin çoğunluğu Kütahya şehir merkezine yakın bir konumda toplanmışlardır. Endüstriyel kaynaklar için elde edilen TF yükü değerleri 7 - 9000 kg/yıl arasında değişmektedir (Şekil 6.3). Yüksek değerler Azot fabrikası ve Termik santralden kaynaklanmaktadır. Bunun en önemli nedeni bu iki fabrikanın atıksu debi

değerlerinin yüksek olmasıdır. Bölgedeki süt ürünleri tesislerinin yıllık yükleri ise sırasıyla 20 kg/yıl' dan düşük düzeydedir. Bunun sebebi süt endüstrilerinin düşük deşarj debilerine sahip olmasıdır.

Genel olarak sonuçlar göstermiştir ki toplam endüstriyel TF yükünün yıllık ortalama değeri (yaklaşık 10 t/yıl) tek başına Kütahya AAT' nin toplam yıllık ortalama değerinden daha düşüktür (yaklaşık 16 t/yıl).



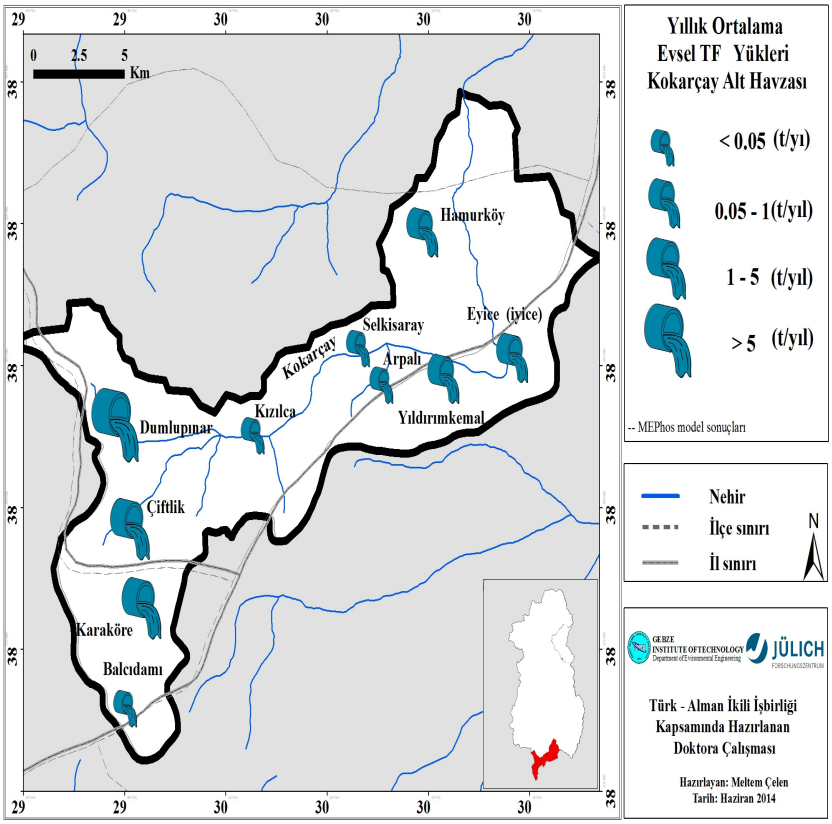
Şekil 6.3: Havzadaki endüstriyel kaynaklı TF yüklerinin kaynak bazında dağılımı.

6.2. Evsel TF Yükleri

Havzadaki toplam evsel yüklerin değeri yaklaşık 30 t/yıl' dır. Kütahya atıksu arıtma tesisinden gelen yükler (15,1 t/yıl) neredeyse tek başına havzanın diğer yerleşimlerindeki fosseptik deşarjlarıyla gelen TF yüklerine (14,9 t/yıl) eşittir. Bu iki kirletici kaynağın tüm yükler içerisindeki oranı % 43 düzeyindedir. Havzada bulunan Kütahya İline kanalizasyon sistemine bağlanmış olan mahalleler dışındaki 220 adet yerleşim için sonuçlar alt havzalar bazında takip eden bölümlerde sunulmaktadır.

6.2.1. Kokarçay Alt Havzası

Baraj gölü havzasının en güneyinde bulunan bu havzada 10 adet yerleşim yeri bulunmaktadır. Üç farklı ilin sınırlarını bulunduran bu havzada 2 yerleşim yeri Afyon, 3 yerleşim yeri ise Uşak İllerinin sınırları içerisindedir. Diğer yerleşimler Kütahya İli sınırları içerisinde olup en önemli yerleşim merkezi Dumlupınar İlçesidir (Şekil 6.4).

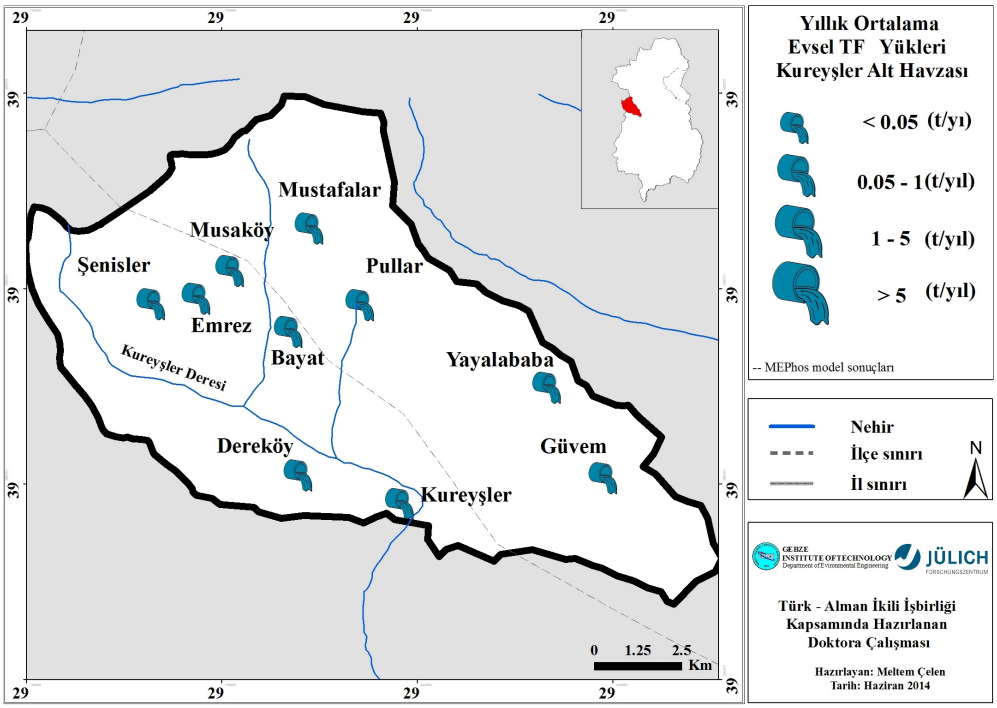


Şekil 6.4: Kokarçay Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

Havzada foseptik sistemi bulunmayan tek yerleşim 59 kişilik nüfusa sahip olana Selkisaray Köyü' dür. Havzadaki toplam TF yükü değeri oldukça düşük olup 0,7 t/yıl'dır. En yüksek yükler Dumlupınar İlçesinden kaynaklanmaktadır (0,46 t/yıl).

6.2.2. Kureyşler Deresi Alt Havzası

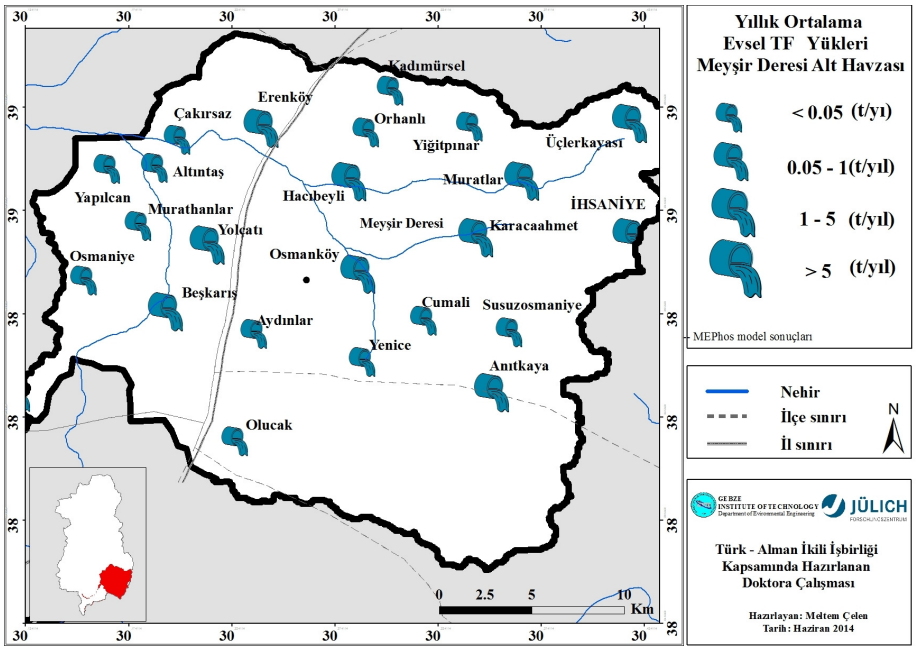
DSİ'nin 00-221 numaralı istasyonu tarafından temsil edilen bu alt havzada Aslanapa İlçesi ve Kütahya İline bağlı bulunan 10 adet yerleşim yeri bulunmaktadır. Şekil 6.5' te görülebileceği gibi yerleşimlerin çoğu akarsu kenarında yer almaktadır. Havzadaki köy yerleşimlerinden 150 kişilik nüfuslu Kureyşler Köyün'de bir kanalizasyon şebekesi bulunmamaktadır. Nüfusları yaklaşık 50 ila 250 kişi arasında değişen bu yerleşimlerin toplam TF yükü yıllık ortalama 0,12 ton'dur.



Şekil 6.5: Kureyşler Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.3. Meyşir Deresi Alt Havzası

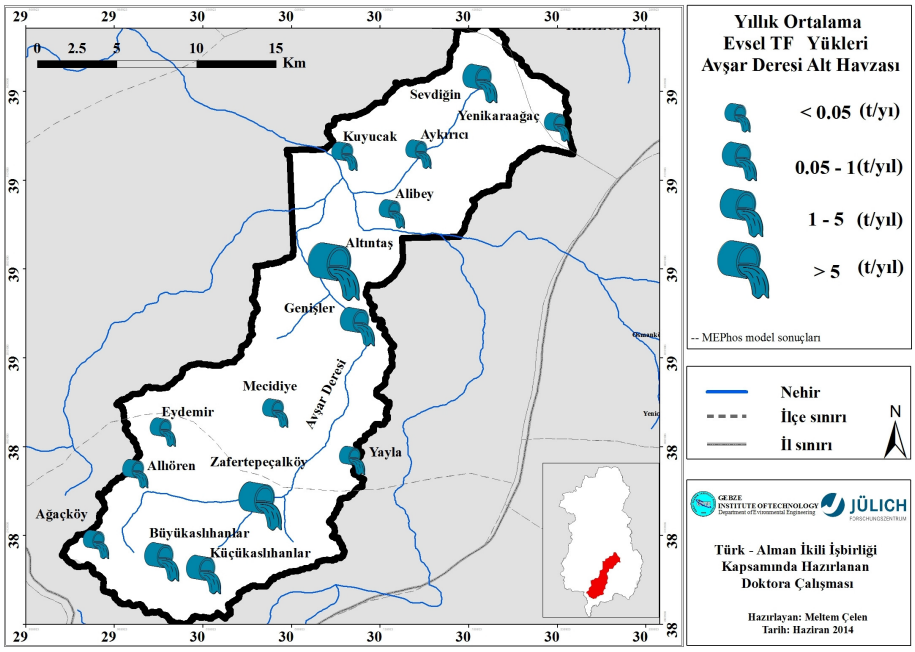
Meyşir Deresi Alt Havzasında toplam nüfusu 12182 olan 23 adet yerleşim yeri bulunmaktadır. En büyük yerleşim yeri Afyon' a bağlı İhsaniye İlçesidir. Toplam TF yükü yaklaşık 3 t/yıl olan alt havzada en yüksek yükler adı geçen ilçe ve beldelerden kaynaklanmaktadır. Ortalama TF yükü ise 0,12 t/yıl' dır. Havzadaki evsel TF yükleri ile ilgili sonuçlar Şekil 6.6' da sunulmaktadır.



Şekil 6.6: Meyşir Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.4. Avşar Deresi Alt Havzası

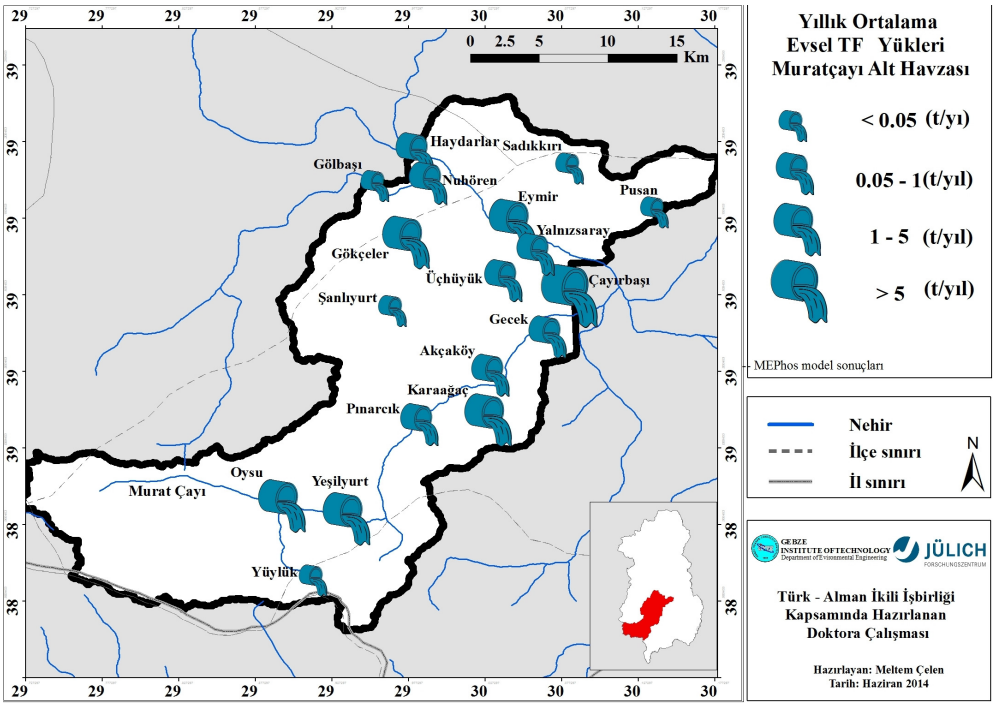
Bu alt havza 9400 kişilik nüfusu sahiptir. En büyük yerleşimleri Altıntaş İlçesi ile Zafertepe Çalköy Beldesi olup toplam 15 yerleşim yeri bulunmaktadır. Toplam TF yükü ise 2,69 t/yıl' dır.



Şekil 6.7: Avşar Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.5. Murat Çayı Alt Havzası

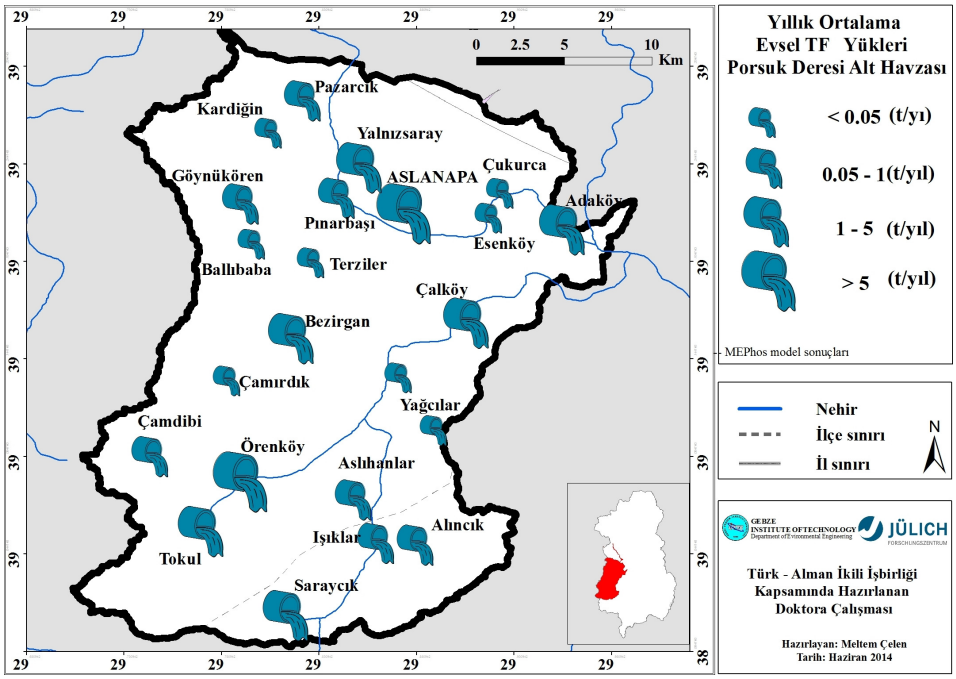
Murat Çayı Alt Havzası Porsuk havzasının güney batı sınırında yer almaktadır (Şekil 6.8). Bu alt havzada 17 adet köy yerleşiminin yanı sıra 1007 kişilik nüfusa sahip Çayırbaşı Beldesi bulunmaktadır. Toplam nüfusu 9326 kişi TF yükü ise 1,35 t/yıl' dır.



Şekil 6.8: Murat Çayı Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.6. Porsuk Deresi Alt Havzası

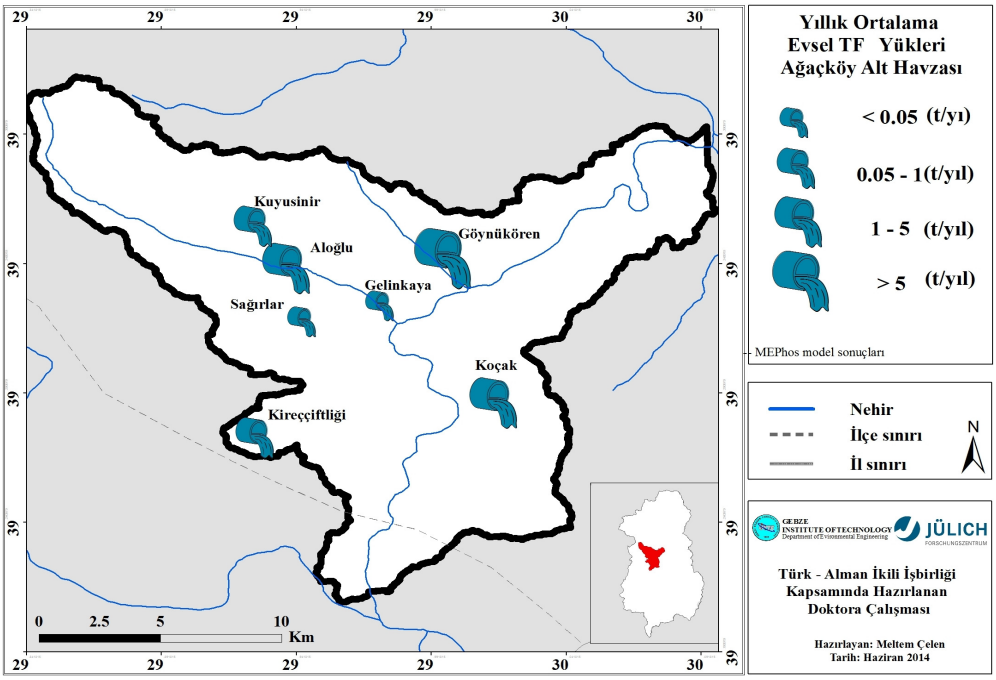
Porsuk Deresi alt havzasında Aslanapa İlçesi dışındakiler köy yerleşimidir (Şekil 6.9). Toplam 22 yerleşim yerinin nüfusu 9814 kişidir. Havzadaki Saraycık, Ballıbaba ve Yağcılar Köylerinin bir kanalizasyon sistemi ve dolayısıyla bir foseptik sistemi bulunmamaktadır. Yıllık toplam TF yükü ise yaklaşık 2,0 t/yıl'dır. En önemli TF yükleri başta Aslanapa İlçesi olmak üzere sırasıyla Örenköy, Tokul ve Çalköy' den kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.9: Porsuk Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.7. Ağaçköy Alt Havzası

Oldukça küçük bir alan kaplayan Ağaçköy alt havzası Porsuk havzasının orta bölümünde yer almaktadır (Şekil 6.10).

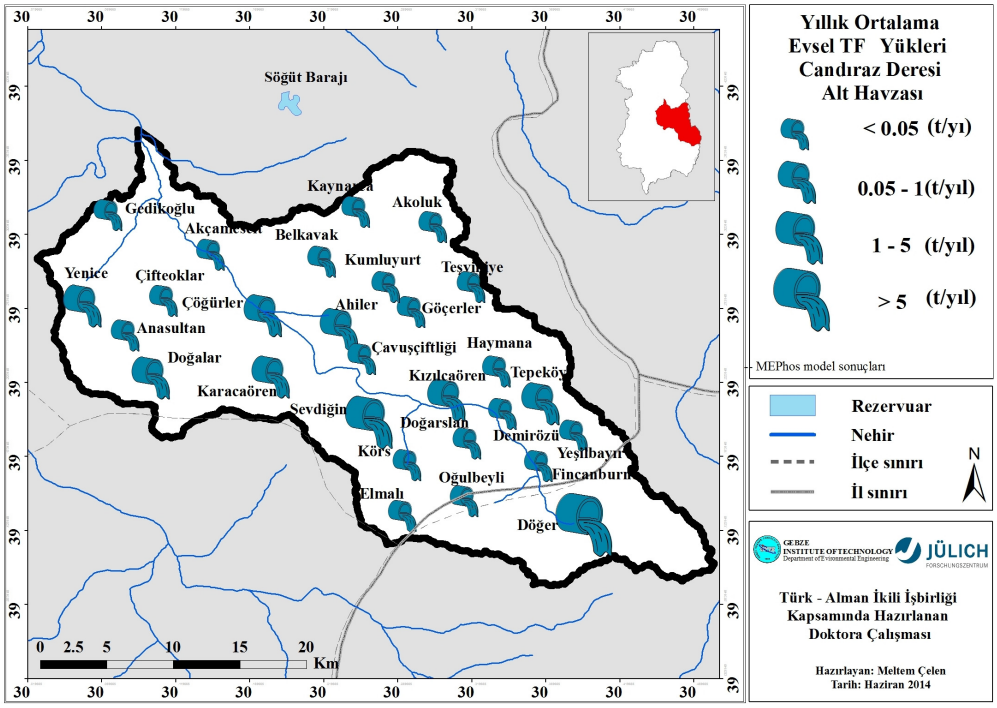


Şekil 6.10: Ağaçköy Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

Bu Alt havzada ortalama nüfusu 81 kişi olan 7 adet köy yerleşim yeri bulunmaktadır. Toplam yıllık TF yükü ise oldukça düşüktür (0,04 t/yıl).

6.2.8. Candıraz Deresi Alt Havzası

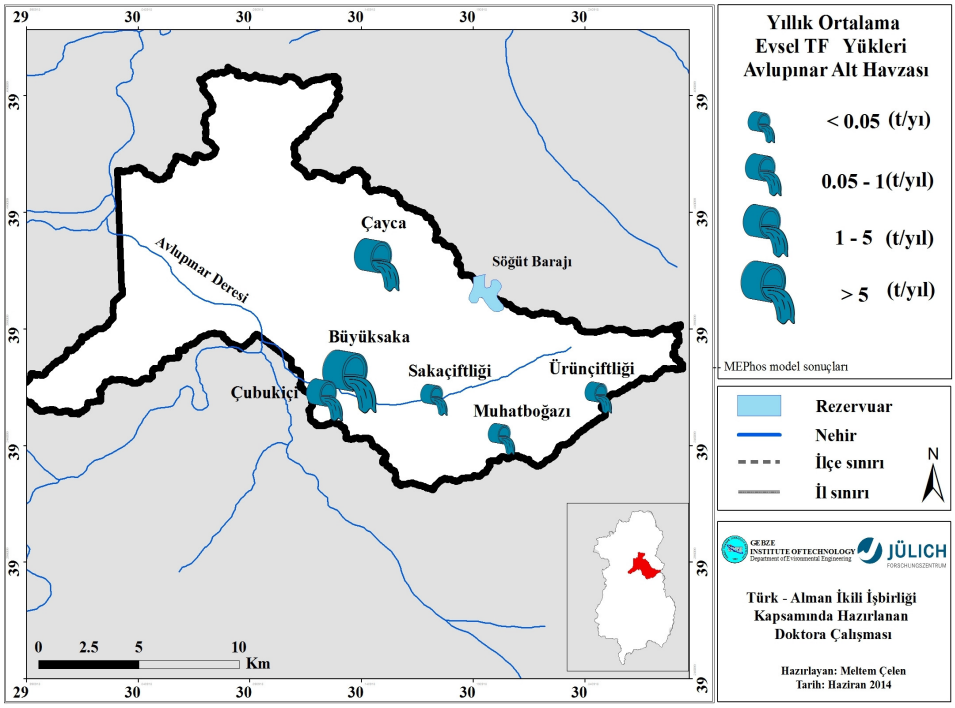
Bu alt havzada bir belde olmasına rağmen 5365 kişilik nüfusuyla bir ilçe özelliğinde olan Afyon'a bağlı Döğer Beldesi en önemli kirletici kaynak durumundadır (Şekil 6.11). Toplam TF yükü 2,65 t/yıl olup ortalama değer ise 0,09 t/yıl'dır.



Şekil 6.11: Candıraz Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.9. Avlupınar Deresi Alt Havzası

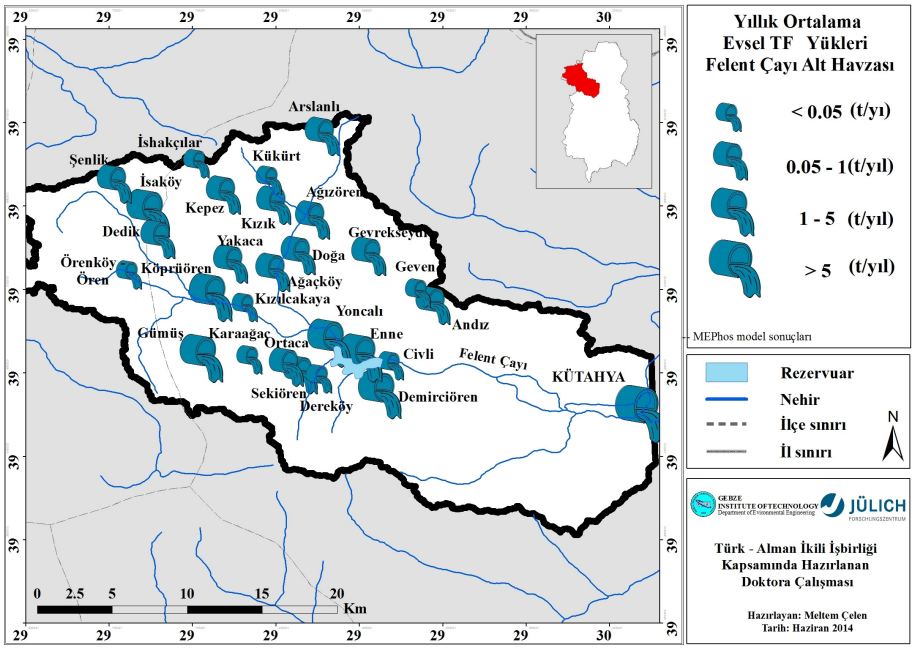
Avlupınar alt havzasında sadece altı adet köy yerleşimi bulunmaktadır (Şekil 6.12). Geçmişte belde olan Büyüksaka köyü 642 kişilik nüfusu ile alt havzadaki en önemli evsel kirletici kaynaktır. Bu alt havzasının TF yükü yıllık 0,13 ton'dur.



Şekil 6.12: Avlupınar Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.10. Felent Çayı Alt Havzası

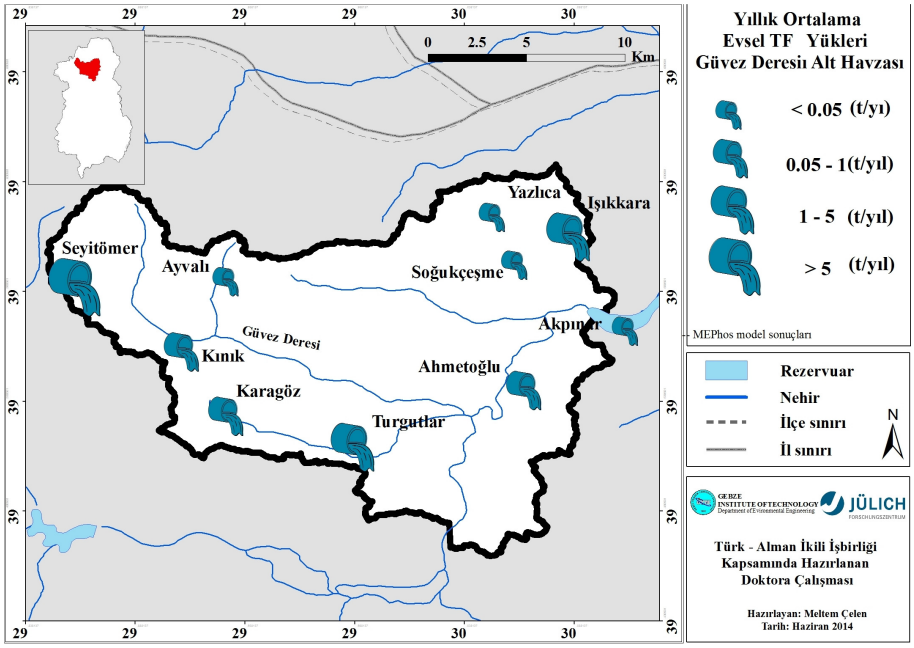
Felent Çayı alt havzasında Kütahya İl merkezinin yanı sıra 27 adet kırsal yerleşim yeri bulunmaktadır (Şekil 6.13). Kütahya dışındaki yerleşim yerlerinin toplam TF yükü oldukça düşük olup 0,74 t/yıl'dır. Kütahya Belediyesi'nin AAT' sinden gelen yükler ise tek başına 15,73 t/yıl'dır.



Şekil 6.13: Felent Çayı Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.11. Güvez Deresi Alt Havzası

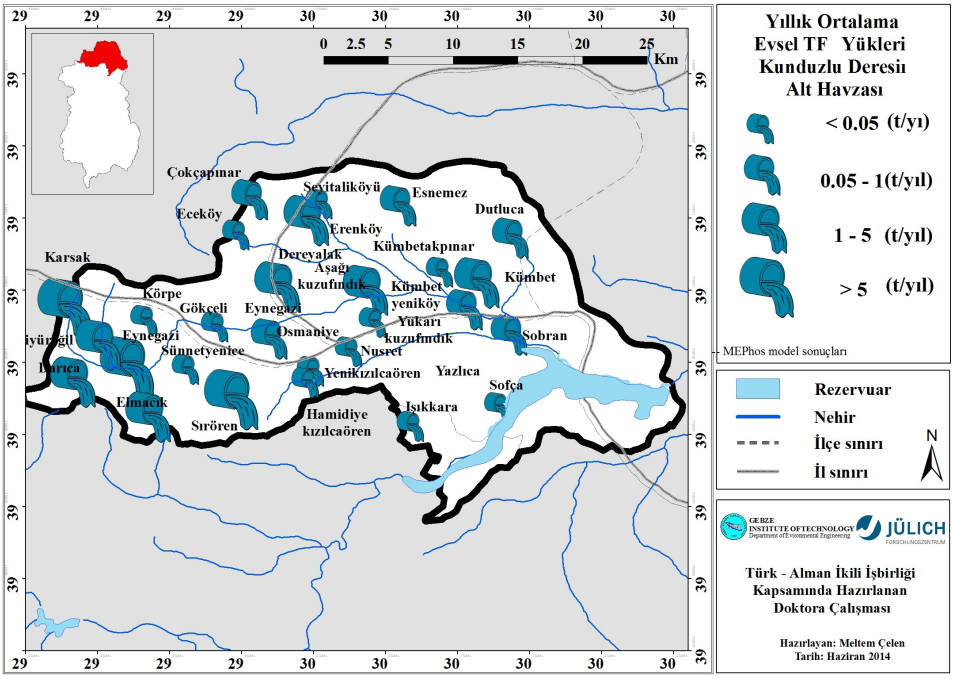
Güvez deresi alt havzasındaki en önemli evsel noktasal kaynak Seyitömer Beldesidir (Şekil 6.14). Yaklaşık 2000 kişilik nüfusa sahip beldenin yıllık toplam TF yükleri 0,65 ton'dur. Havzadaki TF yüklerinin toplamı ise 0,81 t/yıl'dır.



Şekil 6.14: Güvez Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.2.12. Kunduzlu Deresi Alt Havzası

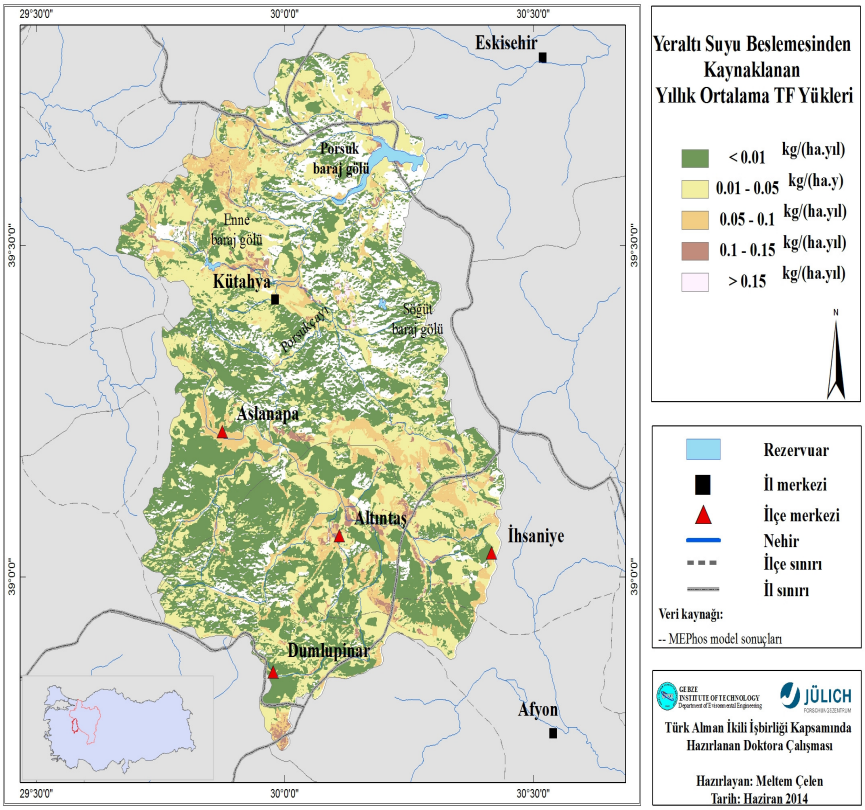
Baraj gölü havzasının en kuzeyindeki bu havza da 3 farklı ile (Kütahya, Eskişehir ve Bilecik) bağlı köy yerleşimleri yer almaktadır. Toplam 29 köy yerleşiminin ortalama yıllık TF yükü 0,8 t/yıl'dır. Sobran ve Sofça köyleri baraj gölünün hemen kıyısında bulunmaları açısından TF kirliliği açısından önemli yerleşim yerlerindedir (Şekil 6.15). Diğer yerleşimlerin de geneli baraj gölüne dökülen dere üzerinde konumlanmışlardır.



Şekil 6.15: Kunduzlu Deresi Alt Havzası yerleşim yerleri ve TF yükleri.

6.3. Yeraltısuyu Deşarjı

Porsuk baraj gölündeki yeraltı suyu deşarjından kaynaklı TF yüklerinin toplam değeri yaklaşık 3 tondur. Şekil 6.16'dan da görülebileceği gibi TF yükü girişlerinin görüldüğü alanlar aynı zamanda yeraltı suyu deşarjının gerçekleştiği düz arazilerdir. Bununla birlikte yoğun TF yükü girişlerinin Porsuk barajının güneyinde ve havzanın orta bölümlerinde olduğu görülmektedir. Düşük TF yükü değerleri (< 0,01 kg/ha.yıl) havzanın güneyinde bulunmaktadır.



Şekil 6.16: Yeraltısuyu deşarjı ile yüzeysel sulara taşınan TF yükü.

6.4. Tarım Alanlarından Kaynaklanan Toprak Taşınımı

Tarım alanlarından toprak taşınımının neden olduğu TF yüklerinin modellenmesi CORINE arazi kullanım haritası sistemindeki sisteme göre belirlenen sulamalı ve kuru tarım alanları için ayrı ayrı yapılmıştır.

Buna göre tüm havza için kuru tarım alanlarından yüzeysel sulara ulaşan TF yükü ortalama 2,2 kg/ha.yıl'dır. Yüksek değerlerin yüksek eğimli tarım alanlarında olduğu ve toplam yükün yaklaşık 25 t/yıl civarında olduğu tespit edilmiştir. Sulamalı tarım alanlarında ise toplam TF yükü 2,5 t/yıl olup bu değer kuru tarım yapılan alanlardaki yükün onda biri düzeyindedir. Sulamalı tarım alanlarında ise birim yükler ortalama 0,9 kg/ha.yıl olarak belirlenmiştir.

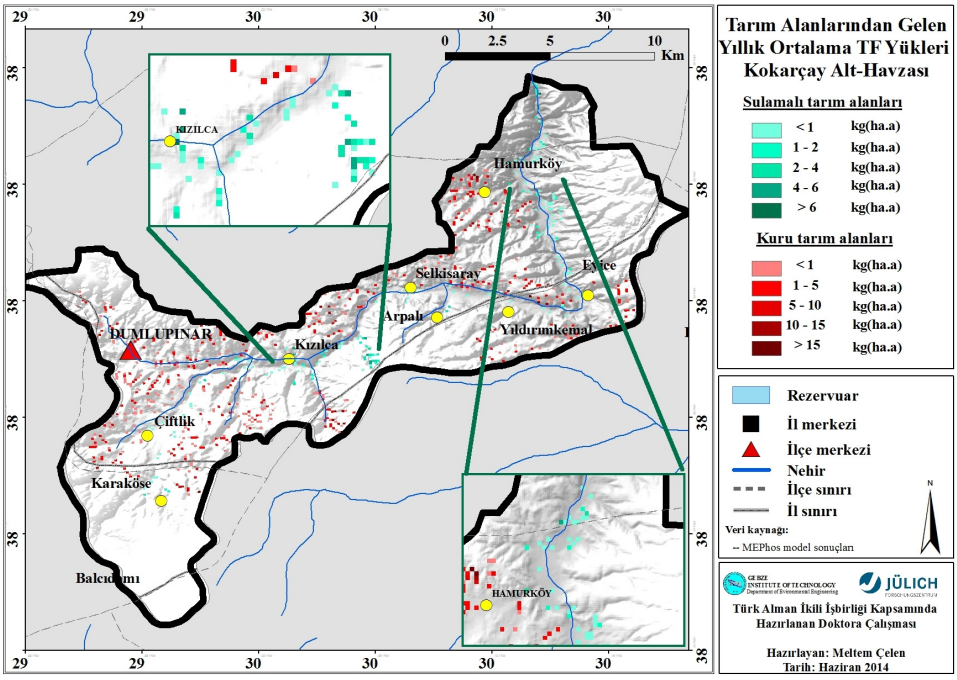
Sonuçların Devlet Su işleri tarafından 1980 [DSİ, 1980] yılında yürütülen benzer bir proje ile karşılaştırılması yapılmış ve havzadaki TF yüklerinin yaklaşık son 25 yılda %6 oranında arttığı belirlenmiştir.

Tüm Porsuk baraj Gölü Havzası için tarım alanlarından kaynaklanan TF yüklerini gösteren bir harita tezin Ekler bölümünde sunulmuştur. Bununla birlikte Sonuçların alt havza bazında değerlendirilmesi takip eden alt bölümlerde yapılmıştır.

6.4.1. Kokarçay Alt Havzası

Porsuk baraj havzasının en güneyinde bulunan 1 numaralı havza DSİ'nin Kokarçay istasyonu (İstasyon No-00-75) tarafından temsil edilmektedir. Havzanın su toplama alanı yaklaşık 202 km^2'dir. Şekil 6.17'de görüleceği gibi kuru tarım alanlarından kaynaklı TF yükü havzanın kuzey sınırı ile Dumlupınar İlçesi etrafındaki tarım alanlarından kaynaklanmaktadır. Kuru tarım alanlarındaki toplam TF yükü 1.32 t/yıl olarak hesaplanmıştır.

Sulamalı tarım alanlarından gelen yükler 1-6 kg/ ha.yıl aralığında değişmekle birlikte bu değerlerin % 43'ü 4 kg/ ha.yıl'dan düşüktür. Bu alanlar Kokarçay'ın Kızılca ve Araplı köylerinin arasındaki ve Hamurköy ile Eyice köyü arasındaki kolları boyunca görülmektedir.

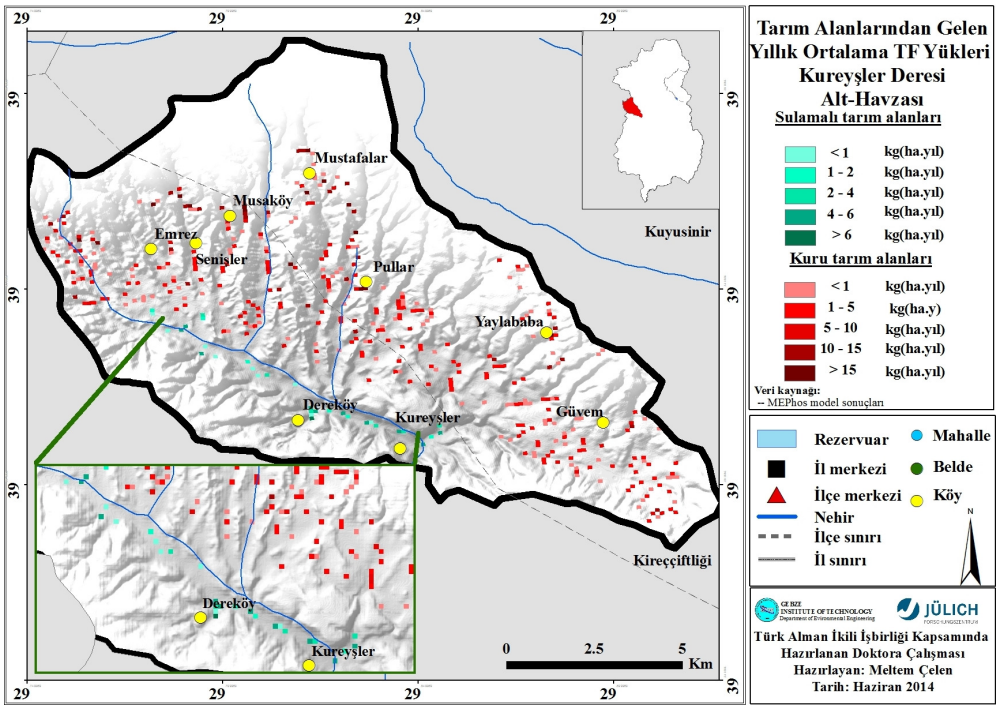


Şekil 6.17: Kokarçay Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.2. Kureyşler Deresi Alt Havzası

Kureyşler deresini içinde bulunduran ve DSİ'nin 00-221 no'lu su kalitesi istasyonunun temsil ettiği bir alt havzadır (112 km^2). Burada kuru tarımdan kaynaklanan yükler Kureyşler deresinin kuzeyinde kalan yamaçlarında daha yoğun olarak bulunmakta ve değerler 1- 15 kg/ha.yıl arasında değişmektedir (Şekil 6.18). Hesaplanan toplam yük ise 1,47 t/yıl'dır.

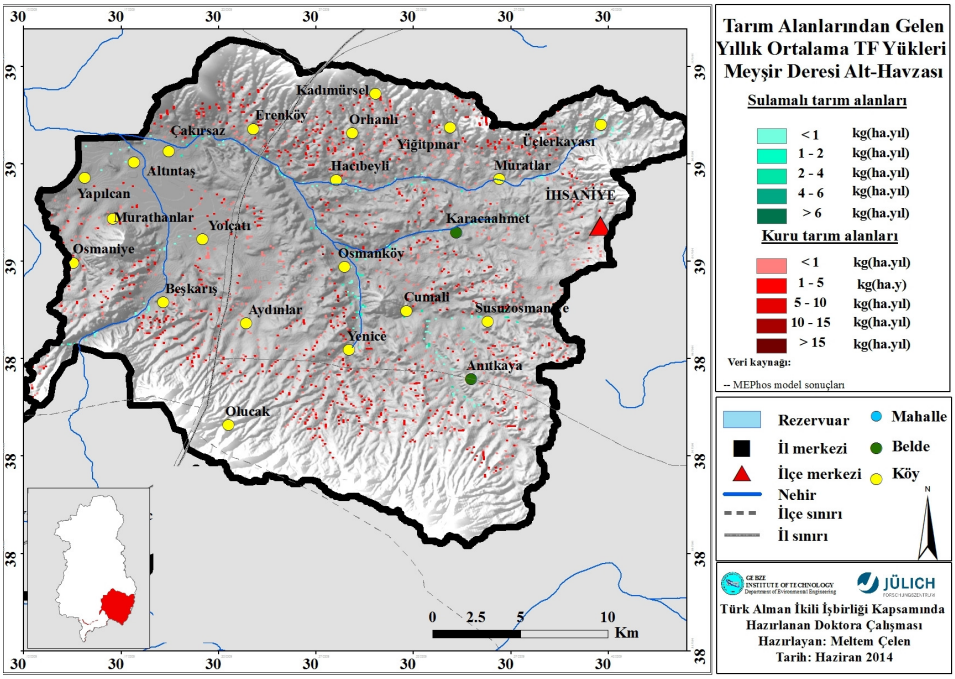
Sulamalı tarım alanları ise derenin hemen iki kıyısında görülmekte ve düşük TF yükü değerlerine sahiptir. Toplam yük 0,92 t/yıl'dır.



Şekil 6.18: Kureyşler Deresi Alt Havzası tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.3. Meyşir Deresi Alt Havzası

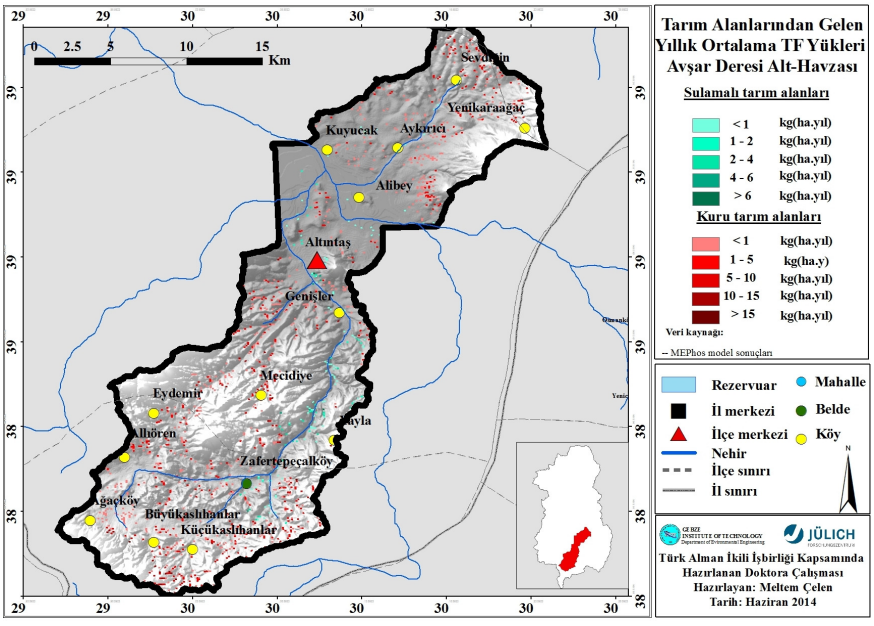
Meyşir Deresi havzasındaki kuru tarım yapılan alanlardan kaynaklı TF yükleri yaygın bir şekilde bulunurken sulu tarım alanlarından gelen yükler diğer havzadakine benzer şekilde nehir kolları boyunca uzanan ve sebze ve meyve bahçelerinin bulunduğu alanlarda görülmektedir (Şekil 6.19).



Şekil 6.19: Meyşir Deresi Alt Havzadaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.4. Avşar Deresi Alt Havzası

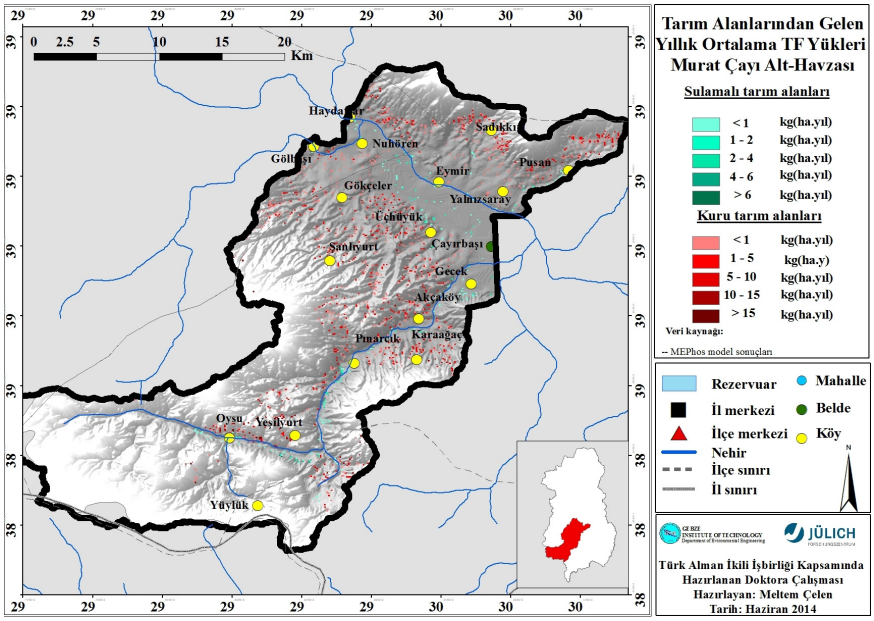
Avşar Deresi alt havzasında TF yüklerinin havzanın güneyinde daha yoğun olarak bulunduğu görülmektedir (Şekil 6.20). Düz alanlarda ise sulamalı tarım alanlarının TF yükleri yoğunluktadır.



Şekil 6.20: Avşar Deresi Alt Havzadaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.5. Murat Çayı Alt Havzası

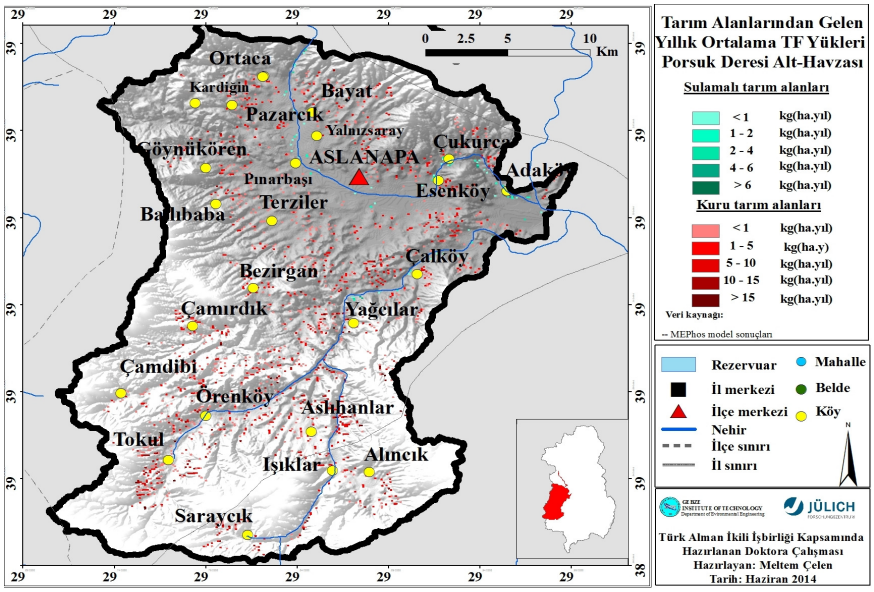
Murat Çayı alt havzasının kuzey doğu sınırındaki yüksek eğimli arazilerde kuru tarım yapılması sebebiyle burada 20 kg/ha.yıl değerini aşan TF yükü değerleri görülmektedir (Şekil 6.21). Güney bölgelerde is aynı durum sulamalı tarım için geçerlidir ve buradaki yüksek eğimli bölgelerde TF değerleri 4 kg/ha.yıl civarındadır.



Şekil 6.21: Murat Çayı Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.6. Porsuk Deresi Alt Havzası

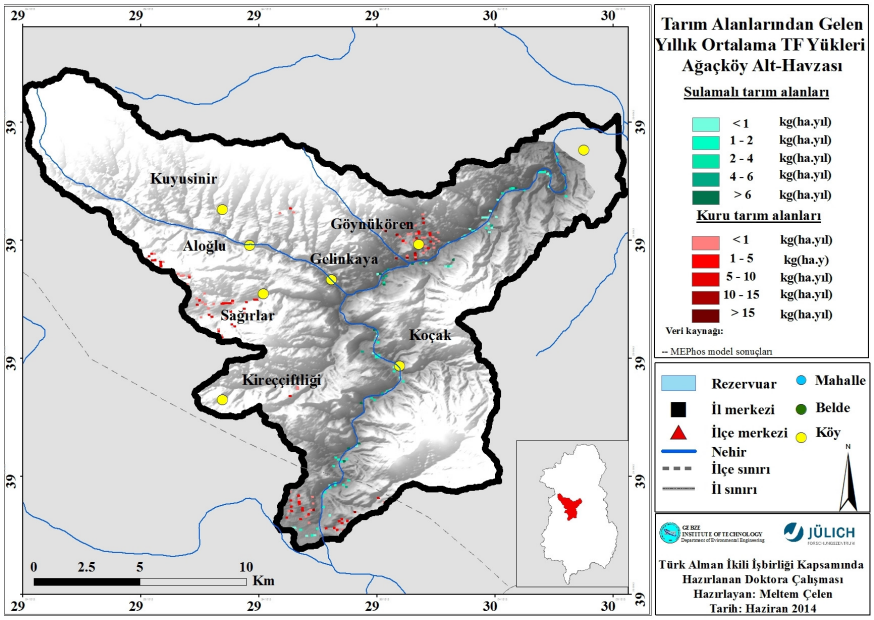
Kütahya'nın Aslanapa İlçesinin yer aldığı Porsuk Deresi alt havzasında İlçenin etrafını çevreleyen yüksek eğimli alanlarda kuru tarım kaynaklı TF yüklerinin geldiği bölgeler görülmektedir (Şekil 6.22). Yine aynı yerleşim yerinin bulunduğu düzlüklerde ise değerleri genellikle 1 kg/ha.yıl' dan düşük olan sulamalı tarım kaynaklı TF yükleri görülmektedir.



Şekil 6.22: Porsuk Deresi Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.7. Ağaçköy Alt Havzası

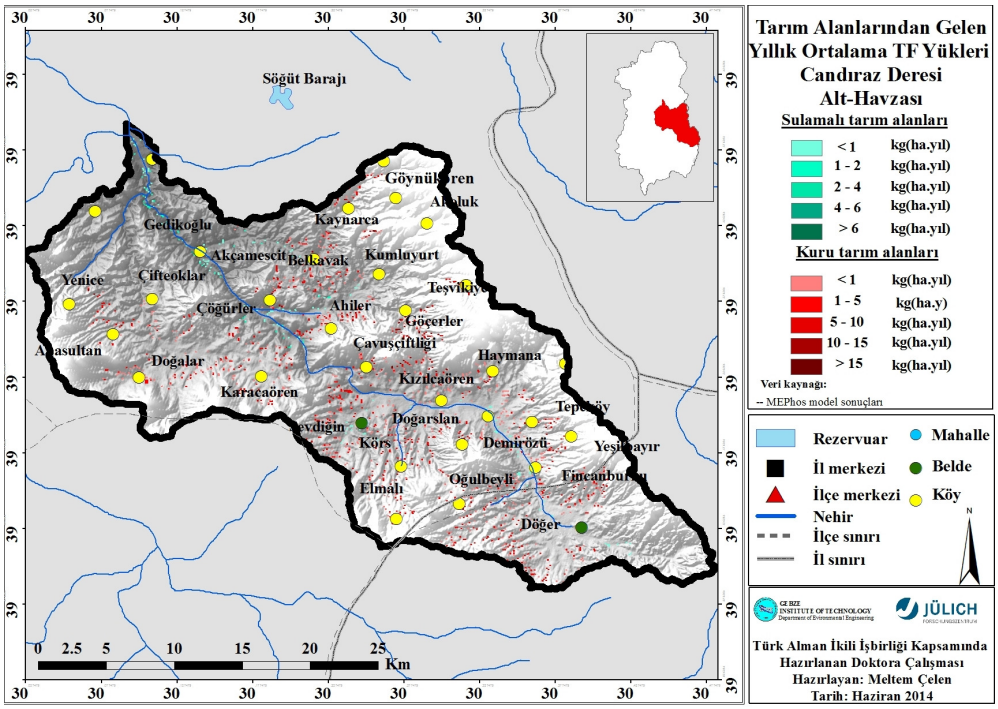
Ağaşköy alt havzasında ise TF yükü oluşan bölgeler oldukça sınırlı olup belirli bölgelerde bulunmaktadır (Şekil 6.23). Bununla birlikte bu alanlardan kaynaklanan birim yükler kuru tarım için 20 kg/ha.yıl, sulamalı tarım için 4 kg/ha.yıl'dan yüksek değerler görülmektedir.



Şekil 6.23: Ağaçköy Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.8. Candıraz Deresi Alt Havzası

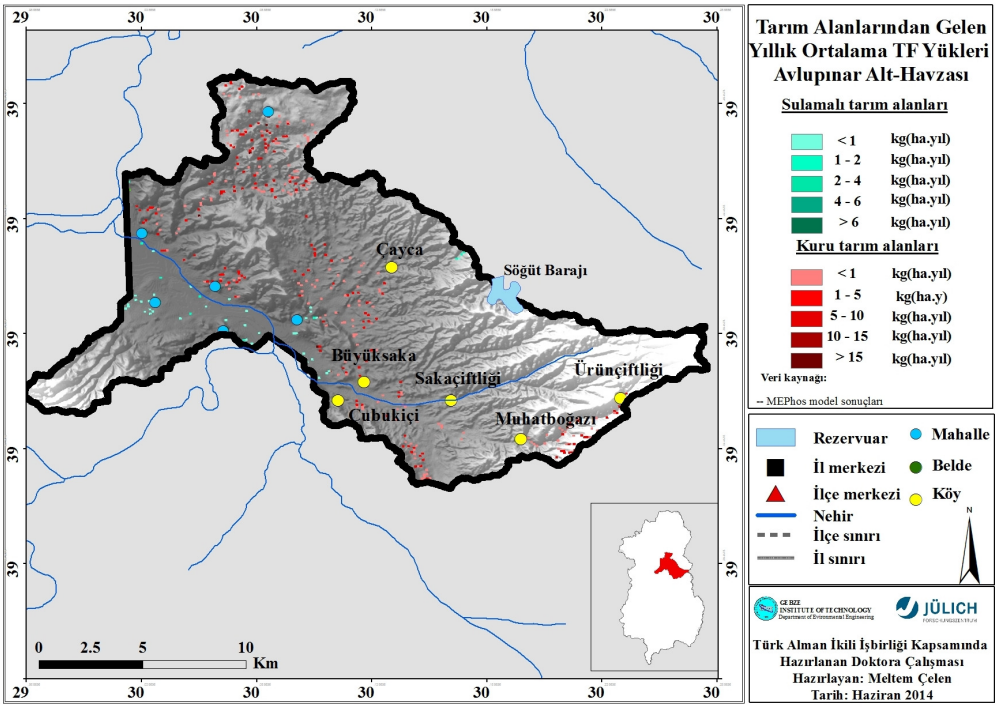
Candıraz deresi alt havzadaki kuru tarım kaynaklı TF yükleri kuzeydeki eğimli bölgelerde ve güneyde yayılı olarak görülmektedir. Şekil 6.24' te görülebileceği gibi kuru tarım kaynaklı TF yükü değerleri yer yer 10 kg/ha.yıl' ı aşsa da genellikle 1-10 kg/ha.yıl arasındadır. Sulu tarım kaynaklı TF yükleri ise havzanın mansap kısmında ve Kızılcaören beldesinin etrafındaki tarım alanlarında yoğunlukta olup TF değerleri 1,0 kg/ha.yıl' ın altındadır.



Şekil 6.24: Candıraz Deresi Alt havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.9. Avlupınar Deresi Alt Havzası

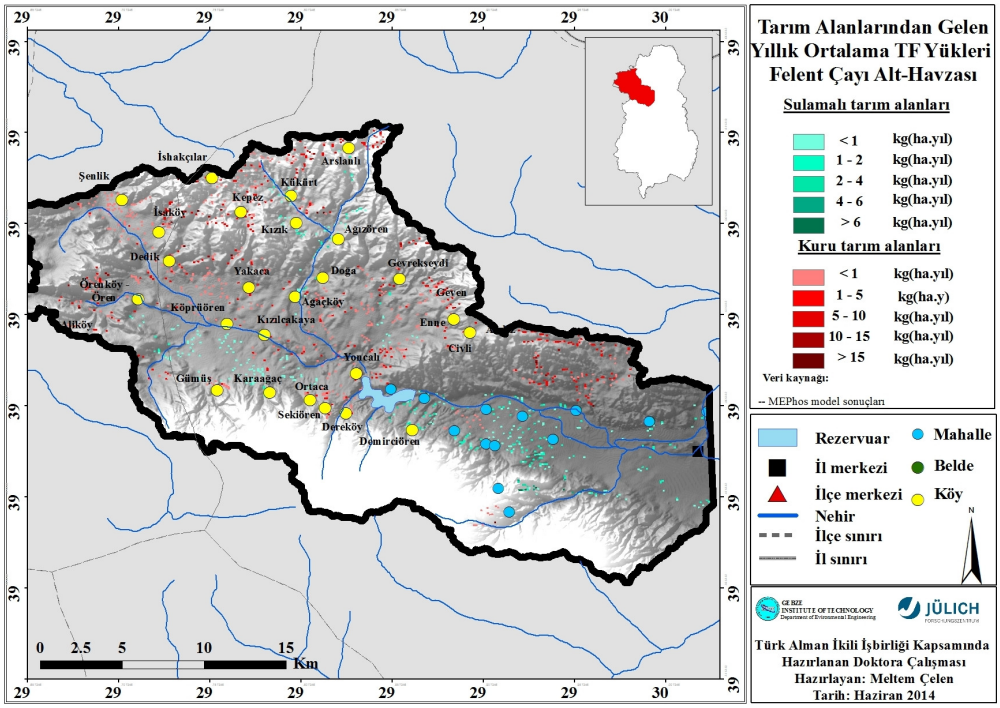
Avlupınar alt havzası Kütahya İline bağlı bazı mahalleleri de içine almaktadır (Şekil 6.25). Bunların etrafındaki sebze ve çilek bahçeleri sulamalı tarım TF yükünü oluşturan ana arazi kullanımıdır. Zığra, Siner ve Alayunt mahallelerinin etrafında bulunan bu arazilerde ortalama birim TF yükü değerleri 1,0 kg/ha.yıl' dan daha azdır. Kuru tarım alanlarında ise ortalama birim yükler 1-10 kg/ha.yıl civarında olup Kırkılı ve İkizüyük mahalleleri arasında yaygın halde görülmektedir.



Şekil 6.25: Avlupınar Deresi Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.10. Felent Çayı Alt Havzası

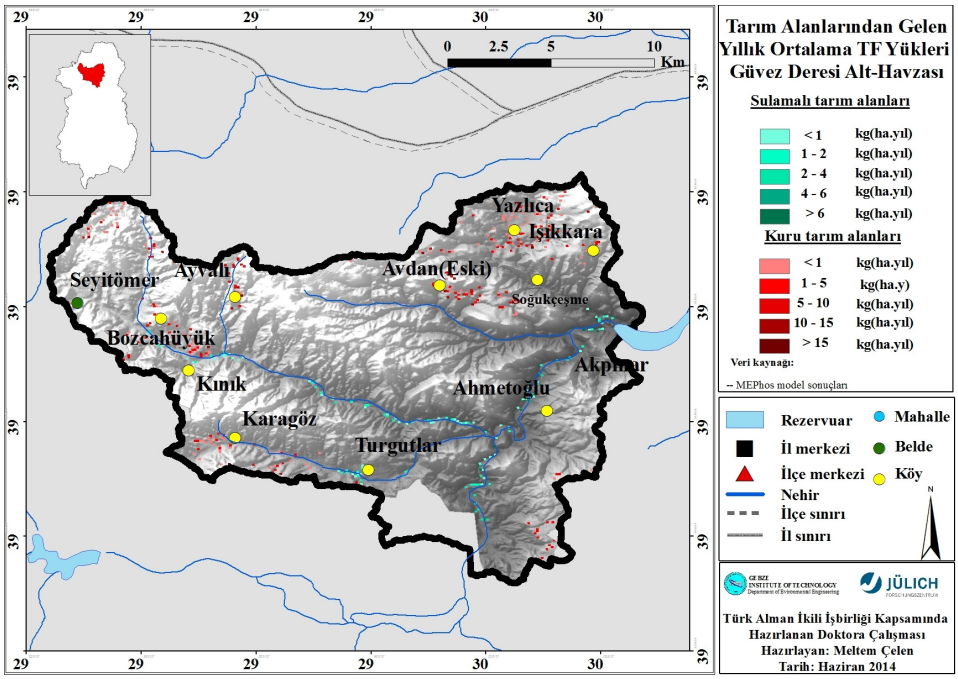
Bu alt havzada diğerlerinden farklı olarak sulamalı tarım alanları yoğunluktadır (Şekil 6.26). Felent çayı kenarındaki Köprüören, Gümüş, Kızılcakaya ve Karaağaç köyleri ve Çivli, Okçu, Bölücek ve Aydoğdu mahalleleri arasındaki düzlüklerde yaygın olarak görülen TF yükleri ortalama 1- 5 kg/ha.yıl arasındadır. Kuru tarım alanları ise havzanın kuzeyinde yoğunluktadır.



Şekil 6.26: Felent Çayı Alt Havzadaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.11. Güvez Deresi Alt Havzası

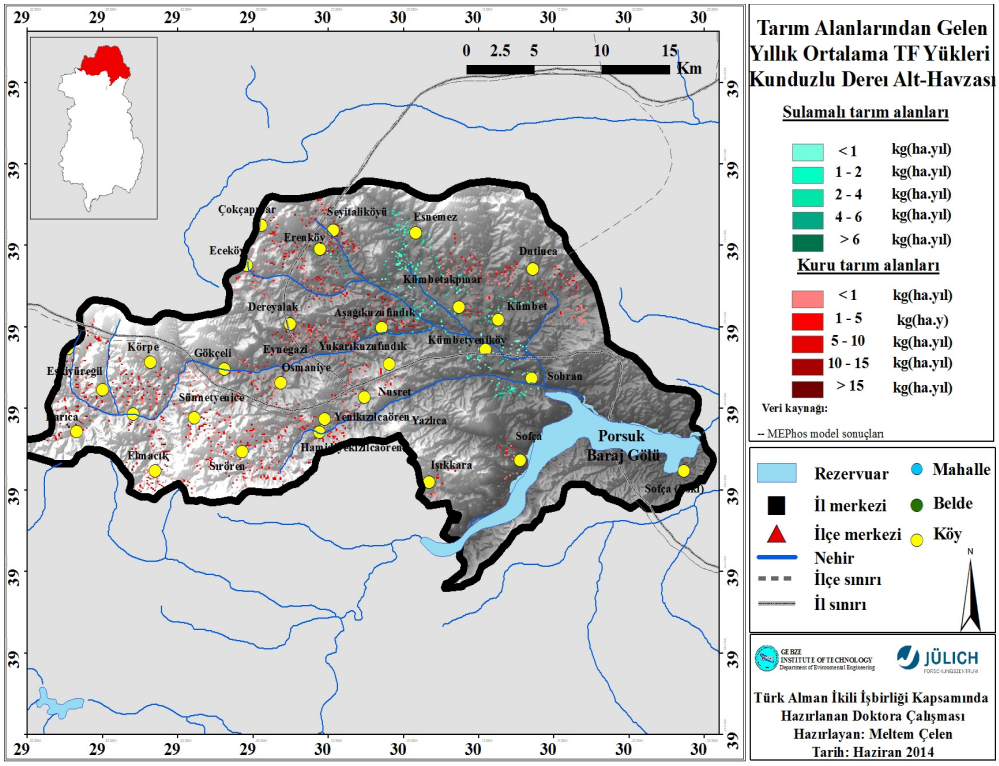
Porsuk baraj gölüne kıyısı bulunan bu havzanın alanı 252,5 km^2'dir. Şekil 6,27'den de anlaşılacağı gibi tarım alanları oldukça dar bir alanı kaplamaktadır. Havzadaki toplam TF yükleri sulamaları tarım için 0,587 t/yıl, kuru tarım alanları için ise 0,968 t/yıl'dır. Haritadan da görüleceği gibi kuru tarım alanları daha çok yerleşim yerlerinin etrafındaki sınırlı bölgelerde yoğunlaşırken sulu tarım alanları dere kenarlarında bulunmaktadır.



Şekil 6.27: Güvez Deresi Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

6.4.12. Kunduzlu Deresi Alt Havzası

Porsuk baraj gölünü de içinde bulunduran bu alt havza Bilecik Eskişehir ve Kütahya il sınırlarının kesişme noktasında olup yaklaşık 583 km^2'lik bir alan kaplamaktadır (Şekil 6.28). Kuru tarım alanları havzanın kuzeyinde ve batısında yayılı durumda olup toplam TF yükü 4,55 t/yıl'dır. Ortalama birim yük değeri 2,5 kg/ha.yıl' dır. Havzanın oldukça engebeli olması sebebiyle 10 kg/ha.yıl' dan yüksek değerler fazlaca bulunmaktadır. Sulamalı tarım alanları Kunduzlu deresinin kollarında, Esnemez ve Sobran köylerinin arasında kalan düzlüklerde görülmektedir. Ortalama birim TF yükü 0,4 kg/ha.yıl olup toplam yük 0,153 t/yıl düzeyindedir.



Şekil 6.28: Kunduzlu Deresi Alt Havzasındaki tarım alanlarından kaynaklanan TF yükleri.

7. SENARYO ANALİZLERİ

Porsuk barajı su kalitesinin iyileşmesinin sağlanmasına yönelik öneriler getirmek amacıyla olarak MEPhos modeli yardımıyla bazı senaryo analizleri yapılmıştır. Bu amaçla Porsuk havzasındaki mevcut TF yükleri ile baraj gölünün kritik TF yükünün ilişkilendirilmesinde Volenweider'ın yaklaşımı [Chapra, 1997 kullanılmıştır. Öncelikle Eşitlik 6.1 yardımıyla Porsuk baraj gölüne verilebilecek en yüksek TF yükü (kritik yük) belirlenmiştir.

$$Lc = P_{tot} \times q_s \times \left(1 + \sqrt{Z / q_s}\right) \tag{7.1}$$

Burada; *Lc,* Kritik TF yükü (mg/m^2.yıl*)*, P_{tot}, Göldeki kritik TF konsantrasyonu (µ/L), q_s, Hidrolik yük (m/yıl), *Z*, ortalama göl derinliği (m)' dir.

Bu yönteme göre baraj gölü için hesaplanan ortala kritik yük 7,9 t/yıl'dır. Bununla birlikte MEPhos model sonuçlarına göre baraj gölüne gelen ortalama yıllık yük yaklaşık 46 t/yıl'dır. Aradaki yaklaşık altı katlık bu fark baraj gölündeki mevcut ötrofikasyonla mücadele için acil olarak çeşitli önlemlerin alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu amaçla havzadaki noktasal ve yayılı kaynakların etkisinin gözlemlemeye yönelik yapılan senaryo değerlendirmeleri aşağıdaki bölümlerde verilmektedir.

7.1. Evsel ve Endüstriyel Kaynaklara Yönelik Analizler

Havzadaki noktasal kaynaklara yönelik senaryo analizinin geliştirilmesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2013 yılında ilan edilen Porsuk Havzası Özel Hüküm belirleme çalışmalarında önerilen deşarj limiti değerleri göz önünde bulundurulmuştur [ÇŞB, 2013]. Bununla birlikte özel hükümde Kütahya belediyesi AAT' si için önerilen değerler mevcut deşarjdaki TF konsantrasyonu değerlerden daha yüksek olduğundan dikkate alınmamıştır.

Yine özel hüküm çalışmasına göre nüfusu 2000'den yüksek olan yerleşim yeri atıksularında TF'un %80 verim ile arıtılarak alıcı ortama verilmesi önerilmektedir. Bu veriler göz önünde bulundurularak havzada nüfusu 2000'den yüksek olan

Altıntaş, İhsaniye İlçeleri ile Seyitömer ve Döğer Beldeleri için bu önerilerin dikkate alındığı bir senaryo uygulanmıştır.

Azot fabrikası ve termik santral için bir limit değer verilmezken şeker fabrikası, mandıra, mezbahane ve Organize Sanayi Bölgeleri için TF limit değeri 2 mg/l olarak verilmiştir. Buna göre Kütahya Azot fabrikası ve Seyitömer Termik Santrali senaryo dışında bırakılarak, havzadaki diğer fabrikaların önerilen limit değerler doğrultusunda deşarj yaptığı kabul edilerek senaryo uygulaması yapılmıştır.

7.2. Tarım Alanlarından Toprak Taşınımına Yönelik Analizler

Tarım alanlarındaki toprak taşınımı bazı iyi tarım uygulamaları ile azaltılabilir. Fakat bu uygulamaların tüm tarım alanları için yapılması ekonomik ve yapılabilirlik açısından mümkün değildir [Yuan et al., 2011]. Bu nedenle Porsuk baraj gölü havzasında kritik düzeyde toprak taşınımı meydana gelen alanlar GIS programı yardımıyla tespit edilmiştir.

Buna göre toprak taşınımının 15 t/ha.yıl' dan yüksek olduğu tarım alanları en riskli olan bölgeler olarak belirlenmiştir. Tablo 7.1' de havzadaki toprak taşınımı miktarlarının yüzdelik dağılımı sulamalı ve kuru tarım alanları için ayrı ayrı verilmiştir. Buna göre tarım alanlarının yarısında toprak taşınımı 0-1 t/ha.yıl aralığında ve bunun % 76'lık bölümü kuru tarım yapılan alanlarda görülmektedir. Bununla birlikte bu alanlardan meydana gelen toprak kaybı toplam toprak kaybının yalnızca % 0,4' ünü oluşturmaktadır.

Tablo 7.1:Toprak taşınımı dağılımı ve ilgili tarım alanı yüzdeleri.

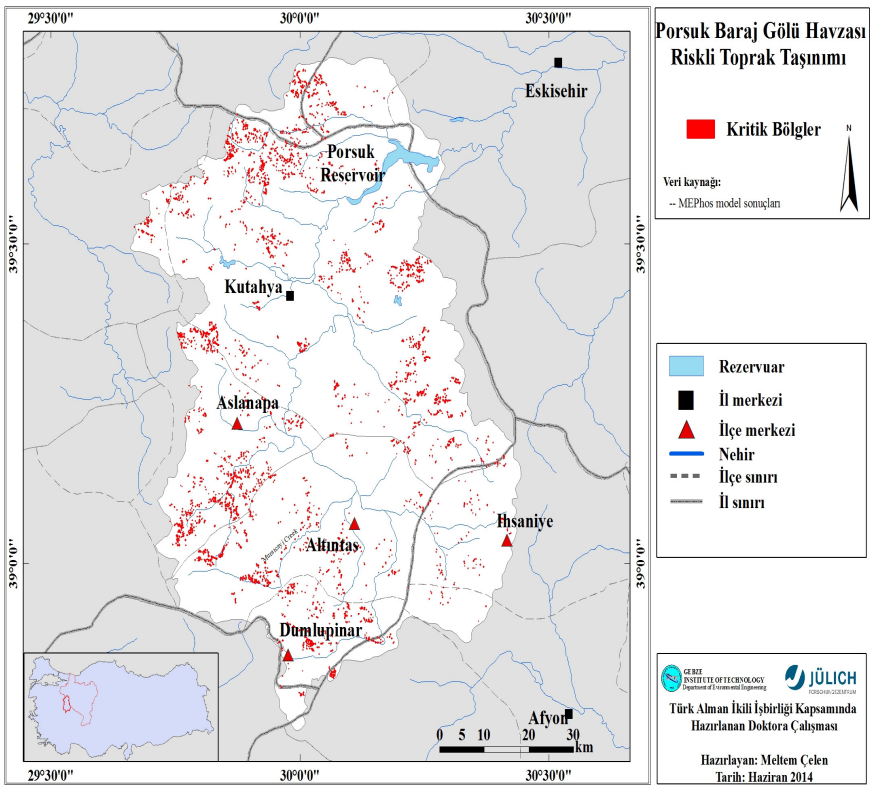
Toprak kaybı riski t/ha.yıl	Alan %	Sulanan tarım alanı %	Kuru tarım alanı %	Toprak taşınımı %
0-1	48,4	23,4	76,6	0,4
1-5	34,6	14,5	85.,5	5,4
5-10	10.1	8,4	91,6	14,9
10-15	3,7	7,5	92,5	26,7
>15	3,2	8,0	92,0	52,6

Yine Tablo 7.1'den görüleceği gibi yıllık 15 t/ha'dan fazla toprak taşınımı toplam alanın sadece %3,2' sinde görülmekte fakat toplam toprak taşınımının yarısından fazlası (%52,6) bu alanlarda oluşmaktadır.

Bu bölgelerde uygulanacak tampon şeritleme, toprak işlemesiz tarım ve şerit ekim gibi partiküler ve çözünmüş fosforun yüzeysel sulara ulaşmasını belli bir oranda önleyecek [Rao et al., 2009] iyi tarım uygulamalarının en etkin sonuçlarının alınabileceği alanlar olarak belirlenmiştir [Kofvacs et al., 2012], [Wu et al., 2013]. Bu yöntemlerle. Analizler göstermiştir ki bu yüksek riskli alanlarda toprak taşınımının %60 oranında önlenmesi diğer kirletici kaynaklarda alınacak önlemlerle birlikte toplam TF yükünde yarı yarıya bir azalma sağlayacaktır.

Ulaşılacak bu değer göldeki mevcut ötrofikasyonu tamamen önleme konusunda yeterli olmamakla birlikte uzun vadede olumlu etkisinin olacağı düşünülmektedir.

Şekil 7.1 Toprak kaybı riskinin 15 t/ha.yıl' dan yüksek olduğu bölgeleri göstermektedir. Aynı harita detayların daha iyi görülebilmesi amacıyla tezin Ekler bölümünde büyük ölçekli olarak sunulmuştur.



Şekil 7.1: Porsuk havzasında yüksek toprak kaybı (>15 t/ha. yıl) riski olan bölgeler.

7.3. Senaryo Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 7.2'de havzadaki kirletici kaynakların model sonucuna göre mevcut durumdaki (2007-2011) TF yükleri ile senaryo sonrasındaki TF yükleri karşılaştırılmaktadır. Buna göre senaryo sonrası durumda noktasal kaynaklarda 6,9 t/yıl değerinde, yayılı kaynaklarda (tarım alanlarından TF taşınımı) ise 17,2 t/yıl düzeyinde bir TF yükü azalım değerine ulaşılması mümkündür.

Bu sonuçları göre Porsuk havzasında yayılı kaynaklara yönelik alınacak TF yükünü azatlına ya yönelik önlemlerin noktasal kaynaklara yönelik alınacak önlemlere göre toplam azalmaya etkisinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.2: Model dönemi ile senaryo sonrası durum için TF yüklerinin karşılaştırılması.

Kirletici kaynak	(2007-2011 için) Mevcut durum TF t/yıl	Senaryo sonrası TF t/yıl	Azalma (%)	Azalma (t/yıl)
Nüfusu 2000'den yüksek olan yerleşim yerleri	5,0	0,9	82,0	4,1
Endüstriler	10,1	7,3	27,7	2,8
Tarım alanları	28,5	11,3	60,35	17,2
Toplam	43,6	19,5	55,27	24,1

8. DEĞERLENDİRME

Kütahya ve Eskişehir İlleri için önemli bir yüzeysel su kaynağı durumundaki Porsuk baraj gölünün trofik düzeyi ötrofik seviyededir. Bu tez çalışmasında, baraj gölünün durum değerlendirmesinin yapılabilmesi ve öneriler sunulması amacıyla GIS arayüzlü ampirik MEPhos modeli 2007-2011 model yılı aralığı için baraj gölü havzasına uygulanmıştır. Modelin uygulama alanına uyarlanması aşamasında bir seri toprak ve atıksu analizleri yapılarak gerekli katsayılar oluşturulmuş yapılan ölçüm sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Arazi çalışmalarıyla ortaya konulan bu ölçüm sonuçlarının ilerideki benzer çalışmalara katkısı olması açısından da ayrıca önemli olduğu düşünülmektedir.

Model yardımıyla elde edilen sonuçlar alt havza bazında incelenmiş ve validasyonlar DSİ'nin su kalite gözlem istasyonları baz alınarak yapılmıştır. Model sonuçları genel olarak kabul edilebilir bir validasyon sonucu sunmakla birlikte Kütahya AAT'nin etkili olduğu alt havzadaki hata oranının yüksek olması ve yayılı yüklerin hakim olduğu Kureyşler Deresi alt havzasında hata oranının sadece % 18 olması modelin yayılı yükleri belli bir noktadan verilen kirletici yüklere (noktasal kaynaklar) oranla daha iyi temsil ettiği sonucunu ortaya koymuştur.

Model sonuçlarına göre havzada oluşan toplam TF yükü yaklaşık 46 t/yıl'dır. Model yardımıyla elde edilen sonuçlardan alt havza bazında yükler incelendiğinde yüklerin birim havza alanındaki dağılımının geniş bir aralık (0,06-40,8 t/yıl) gösterdiği ortaya konmuştur. Bu durum Kütahya il merkezinin ve endüstrilerin birbirine yakın olarak konumlanması ile açıklanabilir. Genel olarak kirletici kaynaklara bakıldığında Kütahya AAT' nin ve tarımsal kaynaklı toprak taşınımının havzadaki TF yükünün en önemli sebebi olduğu söylenebilir.

Yayılı yüklerin alt havzalar bazındaki değerlendirmesi sırasında sulamalı tarım alanlarının kuru tarım alanlarına oranla birim yükünün daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte toprak analizleri sırasında sulamalı tarım alanlarındaki toprakta TF içeriğinin (432,92 mg/kg) kuru tarım alanlarındaki TF içeriğine (359,3 mg/kg) göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda kuru tarım alanlarının havzada yüksek eğime sahip bölgelerde konumlanmış olmasının sulamalı tarım alanlarının ise nehir kollarında ve düz bölgelerde yer alması göz önünde

bulundurulduğunda Porsuk baraj gölü havzasında eğimden kaynaklı toprak taşınımının TF yüklerinin artmasında daha etkili olduğu ortaya konmuştur.

Havzadaki mevcut durumun ortaya konulmasının ardından Porsuk barajının koruma kullanma dengesinin gözetilmesi amacıyla alınabilecek önlemler için senaryo analizleri yapılmıştır. Havzadaki önemli evsel kirleticiler ile tarım alanlarından gelen yüklere yönelik analizlerde noktasal kaynaklardan 6,9 t/yıl azalım gözlemlenirken tarım alanlarındaki azalımın 17,2 t/yıl düzeyinde olacağı tespit edilmiştir. Bu durumda Kütahya AAT 'nin hali hazırdaki mevcut çıkış suyundaki TF konsantrasyon değerinin yasal şartları sağlaması da etkili olacağı açıktır. Ayrıca, mevcut durum için model sonuçları değerlendirildiğinde TF yüklerinin % 40'ının tarım alanlarından toprak taşınımı kaynaklı olduğu görülmüştür. Bu nedenle etkin bir koruma kullanma önerisi sunmak amacıyla sunulacak önlemlerin daha çok tarım alanlarına yönelik olması gerektiği düşünülmüştür. Bu amaçla havzadaki yoğun toprak kaybı (>15 t/ha.yıl) yaşanan tarım alanları tespit edilerek haritalandırılmıştır. Bu harita karar vericiler tarafından kullanılması durumunda en etkin önlemlerin alınabileceği noktaların sunulmasından dolayı kolaylık sağlayıcı bir materyal olarak düşünülmüştür.

Bu çalışmada uygulanan MEPhos model sonuçları GIS tabanlı bu modelin Türkiye şartlarında uygulanabileceğini göstermiştir. Yayılı yüklerin hesaplanmasında kullanılan sediment iletim oranı için tüm havzada Türkiye için Mülga Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE, Şimdiki ismi Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'dür.) tarafından verilen ortalama değerler kullanılmıştır. Bu verilerin her bir alt havza için ayrıntılı olarak belirlenmesi model sonuçlarındaki hata oranını azaltacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte modelin ihtiyaç duyduğu dijital haritaların Türkiye'de yeni yeni üretiliyor olması ve ulaşılabilirliğinin sınırlı olması, kullanıcıların haritaları kendilerinin oluşturmasını gerektirebilmektedir. Bu durum çalışma süresinin uzaması problemini de beraberinde getirmektedir. Diğer havza bazlı modelleme araçlarında da karşılaşılan su kalitesi gözlem verilerinin azlığı ve kalitesi de modelin uygulanması aşamasında karşılaşılan zorluklar arasında sayılabilir. Bu durum model periyodunun 5 yıllık bir süre ile sınırlandırılmasını gerektirmiştir. Farklı kurumların (DSİ, EİE vb.) su kaynaklarında yürüttükleri farklı izleme çalışmalarının entegrasyonuyla bu konudaki eksiklikler giderilebilir.

MEPhos modeli diğer havza bazlı modellerle benzer şekilde farklı alanlarda veri setlerine ihtiyaç duyduğundan (Topografya, su kalitesi, kirletici kaynak verisi

vb.) Türkiye' deki diğer su havzalarına uygulanması düşünüldüğünde havza büyüklüğünün dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Çok büyük havzaların seçilmesi tüm havzayı temsil edecek verilerin kullanılmasını gerektireceğinden model sonuçlarındaki belirsizliği arttıracağı gibi arazi çalışmalarında da daha fazla zaman gerektirecektir. Çok küçük havzaların seçilmesi durumunda ise farklı arazi kullanımlarının ve kirletici kaynak etkisinin görülmesini engelleyeceğinden önerilmemektedir.

Türkiye'deki su kaynaklarının sınırlılığı, artan nüfus ve değişen iklim koşullarının etkisi gibi sebepler göz önünde bulundurulduğunda gelecekte bu tez çalışmasında yürütülen araştırmalara ihtiyacın devam edeceği öngörülmektedir. Bu sebeple yukarıda bahsi geçen ve çalışma sonuçlarını doğrudan etkileyen veri temini ve üretimi konularındaki eksikliklerin giderilmesine yönelik orta ve uzun vadede çeşitli çalışmalar yürütülmelidir. Karar destek sistemlerine, su kalitesi modeli ve bütüncül havza modeli uygulamalarına veri sağlama konusunda Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve ilgili bakanlıkların destekleyeceği projeler ile kısa vadeli çözümlerin üretilmesi mümkündür. İklim değişikliğinin uzun vadedeki etkileri de göz önünde bulundurulduğunda su kaynaklarının korunması ve kullanılması ile ilgili politikaların, etkin bir izleme ve ölçüm stratejisi ile desteklenmesi önemlidir.

KAYNAKLAR

Adalı N. İ., (2004), "Modelling of Nutrient Emissions in Koycegiz Lake-Dalyan Lagoon Watershed - Application of the MONERIS Model", Doctor of Philosophy Dissertation, Istanbul Technical University.

Alganatay N., (1968), "Orta Anadolu Kuzey Bölgesi Topraklarının Fosfor Durumu ve Bu Bolge Topraklarinda Fosfor İhtiyaclarinin Tayininde Kullanilacak Metodlar Üzerinde Bir Arastirma", Doktora Tezi, Ankara Universitesi.

Andersson L., Rosberg J., Pers B. C., Olsson J., Arheimer B., (2005), "Estimating catchment nutrient flow with the HBV-NP model: Sensitivity to input data", Ambio, 34(7), 521–532.

Baker L. A., (1996), "Lakes and Reservoirs", 1st Edition, In: Mays L. W., Editor, "Water Resources Handbook", Mc Graw Hill.

Baloch M. A., (2009), "Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) Model as a Decision Support Tool For a Developing Country-a Case Study from Turkey", Doctor of Philosophy Dissertation, Istanbul Technical University.

Behrendt H., Opitz D., (2000), "Retention of nutrients in river systems dependence on specific runoff and hydraulic load", Hydrobiologia, 410(1), 111–122.

Behrendt H., Venohr M., Hirt, U., Hofmann J., Opitz D., Gericke A., (2007), "The Model System MONERIS, User's Manual", Version 2.0, Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries.

Beim A., Meybeck M., Richard T., (1996), "The use of biological material", In: Chapman D., Editor, "Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring", 2nd Edition, Chapman & Hall.

Berker E., (1972), "Fosfat Kimyası, Kullanılış Alanları ve Süperfosfat", Madencilik Dergisi, 11(4),59–62.

Bulut E., Aksoy A., (2008), "Impact of fertilizer usage on phosphorus loads to Lake Uluabat", Desalination, 226(1-3), 289–297.

Celebi G., (1974), "Orta anadolu Guney Bolgesi topraklarının fosfor durumu ve bu bolge topraklarinda fosfor ihtiyaclarinin tayininde kullanilacak metodlar uzerinde bir arastirma", Doktora Tezi, Ankara Universitesi.

Chapra S. C., (1997), "Surface Water Quality Modeling", 1st Edition, Mc Grw Hill.

Collins R., Whitehead P., Butterfield D., (1999), "Nitrogen leaching from catchments in the Middle Hills of Nepal; an application of the INCA model", Science of The Total Environment, 228(2), 259–274.

ÇŞB, (2013), İçme ve Kullanma Suyu Kaynağı Olarak Porsuk Barajının Korunması ve Özel Hüküm Belirlenmesi Çalışması – Özel Hükümler, Çevre ve Şehirvilik Bakanlığı.

ÇŞB, (2011), Kütahya İl Çevre Durum Raporu, Çevre ve Şehirvilik Bakanlığı.

Demirel B., Yenigün O., Onay T. T., (2005), "Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review", Process Biochemistry, 40(8), 2583–2595.

Demuth S., (1993), "Untersuchung zum Neidrigwasser in West Europa", 1st Edition, Universitat Freiburg i. Br. im Selbstverlag.

DHI, (2007)., Mike She User Manual User Guide, 1st Version, Danish Hydroulic Institute.

Dinçer A. R., Kargı F., (2000), "Seramik Endüstrisi Atıksularının Özewllikleri ve Biyolojik Arıtılabilirliği", Çevre Bilim ve Teknoloji, 1(1), 24–28.

Downer C. W., Ogden F. L., Neidzialek J., Siqing L., (2006), "Streamflow Models". In: Singh V. P., Frevert D. K., Editors, "Watershed Models", Crc Press Taylor and Francis Group.

Dörhöfer G., Josopait V., (1980), "Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate", 1st Edition, E.Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung.

Dörhöfer G., Kunkel R., Tetzlaff, B., Wendland, F., (2001), "Der natürliche Grundwasserhaushalt von Niedersachsen", In: Dörhöfer G. Editor,"Arbeitshefte Wasser", Schweizerbart.

DSİ, (1980), Kıtaiçi Su Kaynaklarının Korunması - Pilot Projesi, Devlet Su İşleri.

Esen E., Uslu O., (2008), "Assessment of the effects of agricultural practices on non-point source pollution for a coastal watershed: A case study Nif Watershed, Turkey", "Ocean and Coastal Management", 51(1), 601-611.

Ewen J., Parkin G., O'Connell P. E., (2000), "SHETRAN : Distributed River Basin Flow Modeling System", Journal of Hydrologic Engineering, 5(3), 250–258.

Fried J.S, Brown D.G, Zweifler M.O., Gold. M. O., (2000), "Mapping contributing areas for stormwater discharge to streams using terrain analysis", In: Wilson J.P., Gallat J.C., Editors, "Terrain analysis-principles and applications",Wiley.

Gerlinger K. U., Scherer U., (1997), "Quantifizierung und Modellierung des Feststoff- und Phosphataustrages von landwirtschaftlichen Nutzflächen", Mitt. Dtsch. Bodenkundl Ges., 83, 419-422.

Gömann H., Kreins P., Kunkel R., Wendland F. (2005), "Model based impact analysis of policy options aiming at reducing diffuse pollution by agriculturea-a case

study for the river Ems and a sub-catchment of the Rhine", Environmental Modelling and Software, 20(2), 261-271.

Graham D. N., Butts M. B., (2005), "Flexible Integrated Watershed Modeling with MIKE SHE", In: Singh V.P., Frevert D.K., Editors, "Watershed Models", Crc Press Taylor and Francis Group.

Guse B., Bronstert A., Rode M., Tetzlaff B., Wendland F., (2007), "Application of two phosphorus models with different complexities in a mesoscale river catchment", Advances in Geosciences, 11, 77–84.

Hadjikakou M., Whitehead, P. G., Jin, L., Futter, M., Hadjinicolaou, P., Shahgedanova M., (2011), "Modelling nitrogen in the Yeşilirmak River catchment in Northern Turkey: impacts of future climate and environmental change and implications for nutrient management", The Science of the Total Environment, 409(12), 2404–2418.

Hennings V., (2000), "Methodendokumentation Bodenkunde – Auswertemethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden", 1st Edition, Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung.

Jansson P.-E., Moon D. S., (2001), "A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality", Environmental Modelling and Software, 16(1), 37–46.

Kacar B., (1965), "Çukurova Bölgesi Topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri", Ziraat Fakültesi Yıllığı, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Kille K., (1970), "Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der Grundwasser-neubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserflüsse", Hydrogeol-Hydrogeochem, 1(1), 85–95.

Kovacs A., Honti, M., Zessner, M., Eder, A., Clement, A., Blöschl, G., (2012), "Identification of Phosphorus Emission Hotspots in Agricultural Catchments", The science of the total environment, 433, 74–88.

Kunkel R, Wendland F., Hannappel S., (2004), "Die natürliche , ubiquitär überprägte Grundwasser- beschaffenheit in Deutschland", 1st Edition, Forschungszentrum Jülich GmbH.

Kunkel R., Eisele M., Schäfer W., Tetzlaff B., Wendland F., (2008),. "Planning and implementation of nitrogen reduction measures in catchment areas based on a determination and ranking of target areas", Desalination, 226(1), 1–12.

Kunkel R., Wendland F., (1998), "Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe - Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen", 1st Edition, Forchung Zentrum Jülich.

Kunkel R., Wendland. F., (2002), "The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins the river Elbe case study", Journal of Hydrology, 259, 152–162.

Mederer J., Hindel R., Rosenberg F., Linhard E., Martin M., (1998), "Geologisches Jahrbuch", 1st Edition , Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung.

Molot L. A., Dillon P. J., (1993), "Nitrogen mass balances and denitrification rates in central Ontario Lakes", Biogeochemistry, 20, 195–212.

Muhammetoglu A., Muhammetoglu H., Oktas S., Ozgokcen L., Soyupak S., (2005), "Impact Assessment of Different Management Scenarios on Water Quality of Porsuk River and Dam System – Turkey", Water Resources Management, 19(2), 199–210.

Muslu Y., (2001), "Göl ve Haznelerde Su Kalitesi Yönetimi", 1st Edition, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi.

Neitsch S. ., Arnold J. ., Kiniry J. R., Williams J., (2011), "Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation", 2nd Edition, Texas Water Resorurces Institute.

O'Neill P., (1993), "Environmental Chemistry ", 2nd Edition, Chapman and Hall.

OECD, (1982), ,Eutrophication of Waters Monitoring assesment and Control, The Organization for Economic Cooperation and Development.

OECD, (2001), ,Environmental Indicators for Agriculture - Volume 3, The Organization for Economic Cooperation and Development.

Özbayrak E., (2011), "Karar Destek Sistemleriyle Su Havzalarının Planlanmasına Yönelik Stratejilerin Geliştirilmesi, Uygulanması ve Çevresel Risk Değerlendirmesi" Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.

Özyurt M. S., Dayıoğlu H., Bilgöl N., Yamık A., (2004)., "Porsuk Baraj Havzasının Kütahya Kökenli Kirlilik Problemi", Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(10), 43–52.

Peschke G., (1997), "Der komplexe Prozess der Grundwasserneubildung und Methoden zu ihrer Bestimmung", In: C. Leibundgut and S. Demuth, Editors, "Freiburger Schriften zur Hydrologie", Albert Ludwigs universitat Freiberg.

Rao N. S., Easton Z. M., Schneiderman E. M., Zion M. S., Lee D. R., SteenhuisnT. S., (2009), "Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading", Journal of Environmental Management, 90(3), 1385–95.

ResGaz 1, Atıksu Arıtım Tesisleri Teknik Usüller Tebliği, 20 Mart 2010 tarih ve 27527 sayılı Resmi Gazete.

Sarikaya H. Z., Sevimli M. F., Koyuncu I., Yuksel E. (2002), "Joint operation of small wastewater treatment plants in Southern Turkey", 5th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems, 127–136, Istanbul, Turkey, 24-26 September.

Schoumans O., Mol-Dijkstra J., Roest C., (2000), "Agricultural and environmental methodologies to describe nonpoint source phosphorus pollution", Agricultural Effects on Ground and Surface Waters: Research at the Edge of Science and Society, 207–211, Wageningen, Netherlans, 1-5 October.

Semmens D. J., Goodrich D. C., Unkrich C. L., Smith R. E., Woolhiser D. A., Miller S. N., (2008), "KINEROS2 and the AGWA modelling framework", In: Wheater H., Sorooshian S., Sharma K. D., Editors, "Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas", Cambridge University Press.

Sharpley A. N., (1980), "The Enrichment of Soil Phosphorus in Runoff Sediments", Journal of Environmental Quality, 9(3), 521–526.

Sharpley A. N., (1985), "The Selective Erosion of Plant Nutrients in RunoW", Soil Science Society of America, 49(1), 1527–1534.

Shilton A. N., Elmetri I., Drizo A., Pratt S., Haverkamp R. G., Bilby S. C., (2006), "Phosphorus removal by an "active" slag filter-a decade of full scale experience" Water research, 40(1), 113–118.

Shoemaker M., Lahlou M., Bryer M., Kumar D., Kratt K., (1997), "Compendium of Tools for Watershed Assesment and TMDL Development", Technical Report no: EPA841-B-97006, United States Environmental Protection Agency, USA.

Siewers U., Tarvainen T., Clemens R., (2003), "Agricultural Soils in Northern Europe A Geochemical Atlas", E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhendlung.

Sommer M., Murschel B., (1999), "Landschaftsmodeliierung für die Umweltplanung", In: Dabbert S., Herrmann S., Kaule G., Sommer M., Editors, "Landschaftsmodellierung für die Umweltplanung", Springer-Verlag.

Tchobanoglous G., Burton F. L., (2003), "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse", 1st Edition, McGraw-Hill.

Tetzlaff B., Kreins P., Kunkel R., Wendland F., (2007), "Area-differentiated modelling of P-fluxes in heterogeneous macroscale river basins", Water Science and Technology, 55(3), 123-131

Tetzlaff B., Vereecken H., Kunkel R., Wendland F., (2009), "Modelling phosphorus inputs from agricultural sources and urban areas in river basins", Environmental Geology, 57(1), 183–193.

Tetzlaff B., Wendland F., (2007), "P-pollution in a heavily urbanized river basin from point and diffuse sources: the River Ruhr case study (Germany)", Water Science and Technology, 56(1), 29-37.

Tetzlaff B., Wendland F., (2012), "Modelling Sediment Input to Surface Waters for German States with MEPhos: Methodology, Sensitivity and Uncertainty", Water Resources Management, 26(1), 165-184.

Tetzlaff B., (2006), “Die Phosphatbelastung großer Flusseinzugsgebiete aus diffusen und punktuellen Quellen”, 1st Edition, Research Centre Juelich.

USGS, (2013), “Mineral Commodity Summaries 2013”, Report no: 978–1–4113–3548–6, United States Geological survey.

UNEP, (2000), ‚Planning and Management of Lakes and Reservoirs: An Integrated Approach to Eutrophication, United Nations Environmental Programme International Environmental Technology Centre.

Venohr M., Hirt U., Hofmann J., Opitz D., Gericke A., Wetzig,A., Ortelbach K., (2009), “The Model System MONERIS Manual”, 2nd Edition, Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries in the Forschungsverbund Berlin.

Web 1, (2014), http://www.nkfu.com/fosfor-nedir-fosfor-elementinin-ozellikleri, (Erişim Tarihi: 28/06/2014)

Web 2, (2014), http://biology.tutorvista.com/ecology/phosphorus-cycle.html, (Erişim Tarihi: 23/07/2014)

Web 3, (2014), http://mrskingsbioweb.com/images/phosphorus.gif, (Erişim Tarihi: 23/07/2014)

Wendland F., Kunkel R., Bogena H., Gömann H., Kreins P., (2007), “Water fluxes and diffuse nitrate pollution at river basin scale: Coupling of agro-economic models and hydrological approaches”, Water Science and Technology, 55(3), 133-142.

Wendland F., Kunkel R., Kunstmann H., Lingemann I., Knoche R., Tetzlaff B., (2009), “Area differentiated analysis of impacts of climate change scenarios on groundwater resources in Northwestern Germany”, Landbauforschung Agriculture and Forestry Research, 328, 11–20, Special Issue.

Westheime F. H., (1992), “The Role of Phosphorus in Chemistry and Biochemistry”, In: Walsh E. N., Griffith E. J., Parry R. W., Quin L. D., Editors, “Phosphorus Chemistry”, American Chemical Society.

Wu L., Long T.-Y., Cooper W. J., (2011), “Simulation of spatial and temporal distribution on dissolved non-point source nitrogen and phosphorus load in Jialing River Watershed, China” Environmental Earth Sciences, 65(6), 1795–1806.

Wu L., Xia T. L., Ma L. X., (2013), “Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the Three Gorges reservoir area - China”, Environmental Earth Sciences, 70 (1), 1405–1422.

Yuan Z., Shi, J.,Wu H., Zhang L., Bi J., (2011), “Understanding the anthropogenic phosphorus pathway with substance flow analysis at the city level”, Journal of Environmental Management, 92(8), 2021–2028.

Yuan Z., Shi, J.,Wu H., Zhang L., Bi J., (2011), “Understanding the anthropogenic phosphorus pathway with substance flow analysis at the city level”, Journal of Environmental Management, 92(8), 2021–2028.

ÖZGEÇMİŞ

Meltem Çelen 1978 yılında İstanbul Beyoğlunda doğdu. İlkokulu İstanbul Karaburun'da orta ve lise öğrenimini ise İstanbul Terkos'da tamamladı. Trakya Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi' nin Çevre Mühendisliği Bölümü' nden 2002 yılında mezun olarak aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans programına başladı. Aynı bölümde 2005 yılı Ekim ayında halen devam etmekte olan Uzman kadrosunda çalışmaya başladı. Yüksek lisans programını 2006 yılında tamamlamasının ardından Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim dalında doktora programına başladı. Doktora tezi süresince Helmholtz Araştırma Kurumu ve TÜBİTAK ikili işbirliği ile verilen doktora bursu ile tez çalışmalarının 13 aylık bölümünü Almanya Julich Araştırma Merkezinde bulunan Institute of Bio- and Geosciences (IBG) da gerçekleştirdi.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Celen M., Engin G., Oncel S., Karpuzcu M., (2012), "Porsuk Baraj Gölü Havzasında Üst Toprak Toplam-P İçeriğinin Arazi Kullanımı İle Değişiminin Araştırılması", Türkiyede Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 40-41, Kasım.

Celen M., Karpuzcu M., Onkal Engin G., Tetzlaff B., Wendland F., (2014), "Modelling total phosphorus input pathways in the Porsuk reservoir catchment in Turkey", Environmental Earth Sciences, Online published, 1-18.

Ek B: Haritalar

Çalışma bölgesinin tamamını gösteren, "Porsuk Baraj Gölü Havzası Kuru Tarım Alanlarından Kaynaklanan Yıllık Ortalama TF Yükleri", "Porsuk Baraj Gölü Havzası Sulamalı Tarım Alanlarından Kaynaklanan Yıllık Ortalama TF Yükleri" ve "Porsuk Baraj Gölü Havzası Riskli Toprak Taşınımı Bölgeleri" haritaları ek olarak takip eden içerikte sunulmuştur.