

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRACE UYDU VERİLERİ İLE  
TÜRKİYE’NİN UZUN DÖNEMLİ  
SU KÜTLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**YOSUN ÖZLEM YILDIRIM  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2015**

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRACE UYDU VERİLERİ İLE  
TÜRKİYE’NİN UZUN DÖNEMLİ  
SU KÜTLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**YOSUN ÖZLEM YILDIRIM  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI  
DOÇ. DR. MEHMET HALİS SAKA**

**GEBZE  
2015**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**INVESTIGATION OF LONG TERM  
CHANGES OF TURKEY'S WATER MASS  
WITH GRACE SATELLITE DATA**

**YOSUN ÖZLEM YILDIRIM**

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF GEODETIC AND PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR

ASSOC. PROF. DR. MEHMET HALİS SAKA

**GEBZE**

**2015**

<b>GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</b>	<b>YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU</b>
----------------------------------	--------------------------------------

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/01/2015 tarih ve 2015/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/01/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yosun Özlem YILDIRIM 'ın tez çalışması Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Mehmet Halis SAKA



ÜYE

: Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU



ÜYE

: Doç. Dr. Mehmet Salim ÖNCEL



### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Deniz ve kara yüzeyindeki su, kar, buzulların yeniden dağılışı, atmosferdeki kütle hareketleri ve buzul sonrası rezonans etkilerinin tümü, dünyanın çekim alanında zamansal değişimlere sebep olan jeofiziksel parametrelerdir. 2002 yılında fırlatılan GRACE, ~200 kilometre çözünürlükle tanımlanan yersel su depoları; yeraltı suları, toprak nemi, yüzey suları, kar, buz suları ve biokütleyi içerisine alan tüm su formlarının dikey birleşeninin aylık değişimlerini yansıtır.

Bu çalışmada, Ocak 2004 ve Haziran 2014 dönemi boyunca, Türkiye su depolarındaki uzun dönemli değişim, GRACE küresel harmonik katsayıları ve GLDAS/Noah karasal yüzey modeli kullanılarak hesaplanmış, karşılaştırma kriteri olarak CNES/GRGS interaktif arayüz ile sağlanan eşdeğer su yüksekliği verileri kullanılmıştır. Farklı çözüm stratejileri ile işlenmiş ICGEM kfilter-DDK ve UT-CSR aylık GRACE küresel harmonik katsayıları kullanılarak, kernel metodu ile hesaplanmış, yersel su depolarındaki değişimler kıyaslanarak, analiz işlemlerimizin tutarlılığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, GLDAS/Noah  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  konumsal çözünürlükteki toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer yükseklik verileri ve CNES/GRGS'den temin edilen verilerle kıyaslanarak, grid su değişimlerinden, bölgesel su değişimlerine geçişteki, analiz işlemleri değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamında, Türkiye'de son 11 yılın en kurak yılı 2008 olarak tespit edilmiş ve su depolarındaki trendin düşüşte olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, Türkiye'nin su depolarındaki uzun dönemli değişimleri, GRACE küresel harmonik katsayılarına uygun ileri analizlerin uygulanması ile elde edilebileceğini göstermektedir. Böylece, yeni ölçme ve değerlendirme teknikleri, ülkemizde, özellikle uzun dönemli su politikalarını değerlendirmemize alternatif sağlayarak, akıllı su yönetimi stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir rol üstlenecektir.

**Anahtar Kelimeler: Türkiye Su Depolarındaki Değişim, Kernel Yöntemi, Bölgesel Su Değişimleri, Bölge Fonksiyonu, GRACE.**

## SUMMARY

The all of, redistribution of water, snow, ice on land and in the ocean, fluctuations in atmospheric mass, postglacial rebound effects, which are caused time-variable Earth's gravity changes, are the geophysical parameters. GRACE, launched in 2002, reflects the monthly changes of vertical all the form of water which include groundwater, soil moisture, surface water, snow, ice, water and biomass with resolution of ~200 kilometers.

In this study, during January 2004 and June 2014 period, long term changes in Turkey terrestrial water storages are computed using monthly GRACE solutions UT-CSR and GLDAS/Noah terrestrial hydrology model. Then the solutions are compared with equivalent water heights obtained from CNES/GRGS interactive interface. Firstly, terrestrial water storage variations are computed using kernel method with two monthly GRACE solutions UT-CSR and kfilter-DDK, then the solutions are compared with each other. The consistency of our analysis process are identified. On the other hand, terrestrial water storage variations are computed GLDAS/Noah terrestrial hydrology model ( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  grids soil moisture, plant water content, snow equivalent height) with different solution strategies, are compared CNES/GRGS equivalent water heights. The process of to transition regional water change from change of water on grid, were evaluated. The consistency of our analysis process are identified. In this thesis, the driest year in the last 11 years in Turkey is found to be 2008 and has been observed trend of Turkey water storage decline in recent years.

This study shows that, GRACE is able to resolve the long-term variations Turkey terrestrial water storage, provided that the appropriate post-processing is applied to GRACE spherical harmonic coefficients. Thus, especially providing an alternative to our long term water policies, the determination of intelligent water management strategies will play an important role.

**Key Words: Turkey Terrestrial Water Storage, Kernel Method, Regional Water Change, Regional Function, GRACE.**

## TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım sűresince, engin deneyimi ve bilgi birikimi ile yol haritamın oluŐmasını saęlayan, fikirleri ve yol gűstericilięi ile alıŐmamın geliŐmesine imkân tanıyan, mesleki anlamda ustam ve tez danıŐmanım sayın Do. Dr. Mehmet Halis SAKA'ya teŐekkűrlerimi sunuyorum.

Yűksek lisans eęitimim, akademik ve mesleki hayatım boyunca, hep yanımda olan, bilgisini sınırsızca paylaŐan, sevgili meslektaŐım, kıymetli babam, Mehmet YAPAR'a, desteklerini kalbimde hissettięim, gűler yűzű ile hayatımdaki her ana imza atan deęerli annem, Aysel YAPAR'a, sonsuz teŐekkűrlerimi sunuyorum.

Bu tezi, ailemizin yeni űyesi yeęenim, Gűke Bilgem űNLű'ye ithaf ediyorum.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	5
2. GRACE (GRAVITY RECOVERY AND CLIMATE EXPERIMENT)	7
2.1. GRACE Ölçme Sistemi	9
2.2. GRACE Veri Sistemi	11
2.3. GRACE ile Gravite Alanı Çözümleri	12
2.4. GRACE Gravite Çözümlerini Etkileyen Faktörler	19
2.4.1. GRACE Uydu Sistemi Çözünürlük Kavramı	19
2.4.2. GRACE Harmonik Katsayılarının İyileştirilmesi	21
2.4.3. Gravite Sinyallerinden Kaynaklanan Hatalar	25
3. GLDAS (GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM)	26
4. VERİ SETLERİ VE METOT	29
4.1. Veri Setleri	29
4.2. Metot	31
5. UYGULAMA	34
5.1. Test Alanı Zambezi Havzası	34
5.1.1. Zambezi Havzası'nın Bölgesel Fonksiyonu	35
5.1.2. Grace ile Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişimin Hesabı	40
5.1.3. GLDAS/Noah ile Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişimin Hesabı	41
5.1.4. Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişim	41
5.1.5. Zambezi Su Depolarındaki Değişimin Değerlendirilmesi	42



5.2. Türkiye Örneği	44
5.2.1. Türkiye'nin Su Potansiyeli	45
5.2.2. Türkiye'nin Bölgesel Fonksiyonu	46
5.2.3. GRACE ile Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Hesabı	53
5.2.4. GLDAS/Noah ile Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Hesabı	54
5.2.5. Türkiye Su Depolarındaki Değişim	54
5.2.6. Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Değerlendirilmesi	56
6. SONUÇLAR ve YORUMLAR	60
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	68

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
$a$	: Dünyanın yarıçapı
$C_{nm}, S_{nm}$	: Gravite alanı küresel harmonik katsayıları
$C_{nm}^e, S_{nm}^e$	: Eigen-6c küresel harmonik katsayıları
$C_{nm}^{ort}, S_{nm}^{ort}$	: Ortalama gravite alanı küresel harmonik katsayıları
GHz	: Gigahertz
GM	: Gravite sabiti
$k_n$	: Yüklenme katsayısı
KHz	: Kilohertz
$m$	: Küresel harmonik katsayılarının açınım sırası
$n$	: Küresel harmonik katsayılarının açınım derecesi
$n_{max}$	: Küresel harmonik katsayılarının maksimum açınım derecesi
$N(\theta, \phi)$	: Jeoit
$P_{nm}$	: Normalize edilmiş Legendre fonksiyonu
$\rho_{ort}$	: Dünyanın ortalama yoğunluğu ( $\sim 5517 \text{ kg/m}^3$ )
$\rho_{su}$	: Su yoğunluğu ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )
$V(r, \theta, \phi)$	: Çekim potansiyeli
$\vartheta(\theta, \phi)$	: Bölge fonksiyonu
$\vartheta_{nm}^C, \vartheta_{nm}^S$	: Çalışma bölgesi küresel harmonik katsayıları
$W_n$	: Guassian yumuşatma fonksiyonu
$W(\theta, \phi)$	: Ağırlıklandırılmış bölge fonksiyonu
$W_{nm}^C, W_{nm}^S$	: Ağırlıklandırılmış bölge küresel harmonikleri
$\Delta C_{nm}, \Delta S_{nm}$	: Gravite alanı küresel harmonik katsayıları değişimi
$\Delta \hat{C}_{nm}, \Delta \hat{S}_{nm}$	: Eşdeğer su yüksekliklerine ait küresel harmonik katsayılar
$\Delta C_{nm}^{strp}, \Delta S_{nm}^{strp}$	: Korelasyon filtresi uygulanan küresel harmonik katsayıları değişimi
$\Delta h(\theta, \phi)$	: Eşdeğer su yüksekliği
$\Delta N(\theta, \phi)$	: Jeoit değişimi
$\Delta \rho(r, \theta, \phi)$	: Yoğunluk değişimi

$\Delta\sigma(\theta, \phi)$	:	Yüzey yoğunluk değişimi
$\overline{\Delta\sigma}(\theta, \phi)$	:	Yüzey kütle anomalisi
$\Delta\bar{\sigma}_{bölge}$	:	Bölge ortalama yüzey kütle yoğunluğu
$\lambda$	:	Yersel çözünürlük
$\Omega_{bölge}$	:	Çalışma bölgesi
ACC	:	Accelerometer
CHAMP	:	Challenging Minisatellite Payload
CLM	:	Community Land Model
CNES	:	Centre National d'Etudes Spatiales
CSR	:	Center for Space Research, University of Texas at Austin
DEOS	:	Delft Institute of Earth Observation and Space System
DLR	:	Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
ECMWF	:	European Center for Medium Range Weather Forecasting
ESA	:	European Space Agency
GESDISC	:	Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center
GFZ	:	GeoForschungsZentrum
GLDAS	:	Global Land Data Assimilation System
GOCE	:	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GPS	:	Global Position System
GRACE	:	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRGS	:	Space Geodesy Research Group, France
GSA	:	Globalstar Silicon Solar Cell Arrays
hl-SST	:	High-Low Satellite to Satellite
ICGEM	:	International Centre for Global Earth Models
ITG	:	Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn
JPL	:	NASA Jet Propulsion Laboratory
KBR	:	K-Band microwave ranging
ll-SST	:	Low-Low Satellite to Satellite
MTA	:	Mass Trim Assembly
NASA	:	The National Aeronautics and Space Administration
NOAH	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
PGR	:	Post Glacier Rebound

ROW	:	Rest of the World
SCA	:	Star Camera Assembly
SDS	:	Science Data System
SGG	:	Satellite Gravity Gradiometer
SLR	:	Satellite Laser Ranging
TWS	:	Total Water Storage
USO	:	Ultra Stable Oscillator
VIC	:	Variable Infiltration Capacity Model

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Şekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Yeni nesil gravite alanı belirleme uyduları.	7
2.2: GRACE uydu mekanizmasının sensör konfigürasyonu.	9
2.3: GRACE ölçme sistemi.	10
2.4: K-bant mesafe değişimi ölçme mekanizması.	11
2.5: ' $P_{nm} \cos(\theta) \cos m\phi$ ' için küresel harmonik örnekleri.	20
2.6: GRACE uygulamaları için uygun tabaka kalınlığı.	21
2.7: Guassian yumuşatma filtresi.	23
2.8: Grace ile elde edilen aylık eşdeğer su kütle değişimleri.	24
3.1: Giavonni görselleştirme ve analiz aracı.	28
4.1: GRACE veri işleme adımları-1.	31
4.2: GRACE veri işleme adımları-2.	32
4.3: GLDAS veri işleme adımları.	33
5.1: Zambezi Havzası ve Zambezi Havzası su ağı.	34
5.2: Zambezi Havzasının maskelenmesi ve oluşturulan grid ağı.	35
5.3: Zambezi Havzasının nümerik integrasyonu için kullanılan üçgenleme.	36
5.4: Zambezi Havzası'nın kernel yaklaşımını esas alan küresel harmoniklerle dünya üzerinde gösterimi.	36
5.5: Zambezi'nin kernel yaklaşımını esas alan bölgesel sinyalleri a) Boylam yönünde, b) Enlem yönünde.	37
5.6: Farklı yumuşatma yarıçapları uygulanan Zambezi Havzası bölge sinyalleri.	38
5.7: Farklı yumuşatma yarıçaplarına sahip kernel yöntemiyle hesaplanmış Zambezi bölgesel sinyallerinin küresel harmoniklerle gösterimi a) 200 km, b) 300 km, c) 340 km, d) 400 km.	40
5.8: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 1.	42
5.9: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 2.	42
5.10: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 3.	43
5.11: Türkiye ve Türkiye'ye ait 26 Havza.	44
5.12: Türkiye'nin maskelenmesi ve oluşturulan grid ağı.	46

5.13:	Türkiye'nin nümerik integrasyonu için kullanılan üçgenleme.	47
5.14:	Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan küresel harmoniklerle dünya üzerinde gösterimi.	48
5.15:	Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan a) 39° enlemine, b) 34° boylamına ait sinyallerin bölge içerisinden geçiş kesiti.	48
5.16:	Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan bölgesel sinyalleri a) Boylam yönünde, b) Enlem yönünde.	49
5.17:	Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan a) 39° enlemine, b) 34° boylamına ait 200 km yarıçaplı yumuşatma filtresi ile filtrelenmiş sinyallerin bölge içerisinden geçiş kesiti.	50
5.18:	Farklı yumuşatma yarıçapları uygulanan Türkiye bölge sinyalleri.	51
5.19:	Farklı yumuşatma yarıçaplarına sahip kernel yöntemiyle hesaplanmış Türkiye bölgesel sinyallerinin küresel harmoniklerle gösterimi a) 200 km, b) 240 km, c) 300 km, d) 400 km.	53
5.20:	Türkiye'nin su depolarındaki değişim 1.	55
5.21:	Türkiye'nin su depolarındaki değişim 2.	56
5.22:	Türkiye'nin su depolarındaki değişim (UT-CSR).	57
5.23:	Türkiye'nin su depolarındaki değişim (GLDAS).	58
5.24:	Türkiye'nin yıllara göre kar değişim oranı.	59
5.25:	Türkiye'nin yıllara göre yağmur değişim oranı.	59

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: ' <i>kn</i> ' Y¼klenme katsayısı.	14
4.1: Zambezi UT-CSR verisi bulunan aylar.	30
4.2: T¼rkiye UT-CSR verisi bulunan aylar.	30

# 1. GİRİŞ

Dünya, dağılımları sürekli değişen yeraltı suyu, toprak nemi, kar ve buzullar ile akışkan, hareketli atmosfer ve okyanusların oluşturduğu su döngüsünden meydana gelen dinamik bir sistemdir. Bu sistem dinamiklerinin, her birinin değişimi yer gravite alanındaki değişmelere karşılık gelir.

Yerin çekim alanındaki zamansal ve konumsal ölçekteki değişimler, kütle dağılımındaki değişimleri tanımlamak için kullanılır. Çünkü gravite (çekim alanı) sinyallerinin kısa süreli (aylık) değişimleri, katı dünyaya ait sinyallerden çok, yerkürenin akışkanlarla kaplı kaynaklarından gelen sinyallerden oluştuğu söylenebilir. Nitekim akışkan dünya bileşenleri, katı dünya bileşenlerine göre daha fazla hareket halindedirler [1]. Bu nedenle, yüksek doğrulukta uydu gravite ölçmeleri, başta hidrolojik olmak üzere oşinografik, kriyosfer ve atmosferik kaynakların zamanla değişimleri hakkında önemli bilgi depolarından biridir.

Dünya çekim alanı ve zamansal değişimlerini yüksek doğrulukta ölçmeyi hedefleyen CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) yeni nesil gravite alanı belirleme uyduları geliştirilmiştir. CHAMP, dünya çekim alanının uzun dalga boylu bileşenlerini belirleyen ilk uydu iken, CHAMP'in devamı niteliğindeki GRACE, dünya gravite alanını ve zamansal değişimlerini tanımlar. GOCE ise dünya statik alanını, mümkün olan en yüksek konumsal çözünürlükle tanımlamak üzerine odaklanmıştır. Ortak misyonları gravite alanını belirlemek olsa da; GRACE gravite alanı ve onun değişimlerine neden olan kaynakları hassas bir şekilde belirleyebilmesi açısından öne çıkmaktadır.

GRACE, dünyaya ilişkin detaylı gravite ölçmeleri yapmak, bu sayede kara, deniz ve buzullar üzerindeki su rezervuarlarını araştırmak üzere 17 Mart 2002 tarihinde fırlatılmıştır [2]. GRACE uyduları, dünya yüzeyinden ~500 km yüksekteki aynı yörünge düzleminde biri önde diğeri arkada, aralarındaki mesafe yörünge hareketleri süresince sürekli değişim halinde ve ~220 km olmak üzere konumlandırılmış iki eş uydudan oluşur. Uydular güçlü gravite (yoğun kütle konsantrasyonu, farklı kütle yoğunluğu olan) alanı olan bir bölgeden geçerlerken, ilk önce öndeki uydu etkilenir, bu güç onu arkasındaki uydudan uzaklaştırır ve gravitenin değiştiği yere kadar devam eder. Gravitenin değiştiği yerden geçerken, arkadaki uydu öndeki uyduya yaklaşır. Böylece uydular arası değişim meydana gelir.



Bu değişimini 10 $\mu$  duyarlılıkta belirleyen ve iyonosfer gecikmesinin modellenmesi için iki farklı frekansı [K-bant (24 Ghz), Ka-bant (32 Ghz)] kullanan KBR (K-Band microwave ranging) uzunluk ölçme sistemi ile ölçerek dünya yüzeyi ve yüzeyinin altındaki değişimleri belirler.

GRACE, dünya yüzeyinin ve onun altındaki tüm kütlelerin dağılım ve değişimlerine duyarlıdır. GRACE, okyanus, katı dünya gelgitleri, akıntı ve rüzgârların neden olduğu, ikiz uydular arasındaki  $\sim 2\mu m$  değişimi dahi, KBR uzunluk ölçme sistemi ile belirleyebilecek hassasiyete sahiptir. Bu hassasiyet, GRACE uydularının her birinin kütle merkezlerine, yerçekimi dışındaki hareketlenmeler ölçen yüksek duyarlılıklı ivmeölçerler ve uyduların yörüngelerindeki konumlarını cm'den daha iyi duyarlılıkta belirleyen GPS alıcıları ile de desteklenir.

GRACE (range-rate) mesafe değişim verilerinden, Seviye-2 ve maskon (Seviye-3) olmak üzere iki çeşit ürün sunulmaktadır. Seviye-2 ürünleri, gravite alanının küresel harmoniklerle ifade edildiği standart GRACE Seviye-2 küresel harmonik katsayılarıdır. Bu katsayılar, çeşitli veri merkezlerinde farklı hesaplama stratejileri ile hesaplanmış olup, UT-CSR (Center for Space Research, University of Texas at Austin, USA), GFZ (GeoForschungsZentrum), JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory), DEOS (Delft Institute of Earth Observation and Space System), ITG (Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn, Germany), CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), GRGS (Space Geodesy Research Group, France), GRACE, çözüm merkezleri üzerinden 1 aylık periyotlar halinde, belirli açınım derecesinde ve konumsal çözünürlükteki stokes katsayıları şeklinde yayınlanmaktadır. Seviye-2 değerleri, yerin gelgit etkileri gibi sistematik gravite değişimlerinden arındırılmıştır. Maskon ürünleri üzerinden ise, bir bölgeyi tanımlayan özel coğrafik maskonlar ( $1^\circ \times 1^\circ$ ,  $4^\circ \times 4^\circ$ , vb.) şeklinde K-bant verilerinden kütle değişiminin direkt tahmini yapılabilmektedir. Maskonlar global ortalama yerçekimi alanına, coğrafik olarak belirli bir düzeltme getirmek için kullanılırlar. Her bir maskon belirli zaman aralığında önceden belirlenmiş bir bölgedeki yüzey kütesinin fazlalığını ya da eksikliğini (değişimi) ifade eder. Maskon bölgelerinin her biri dikdörtgen şeklinde olup, eşdeğer su yüksekliği şeklinde ifade edilen kütle katmanını göstermektedir.

Yüzey kütle değişimlerinin, birincil derecedeki etmeni karasal su miktarındaki değişimlerdir. TWS (Terrestrial Water Storage-Karasal Su Depoları) yüzey suyu, toprak nemi, yeraltı suyu, bitki su muhtevası, kar, buz ve tiyal tabaka dâhil, kara

yüzei üzerinde biriken suların tamamı anlamına gelir. TWS, küresel hidrolojik döngüde etkili bir bileşendir ve dünyanın iklimi üzerinde önemli bir rol oynar [3]. Dinamik su döngüsünde TWS ile iklim, coğrafya, insan arasında interaktif bir ilişki vardır. TWS değişimini belirleyebilmek, tüm bu etmenlerin değişimlerinin global ve anlık belirlenebilmesi ile mümkündür. GRACE ile gravite ölçmelerinden tanımlanan TWS; yeraltı suları, toprak nemi, yüzei suları, kar, buz suları ve biokütleyi içerisine alan tüm su formlarının dikey birleşeninin aylık değişimlerini yansıtır.

GRACE, TWS'yi yüksek duyarlılıkta belirleyebilmesine karşın TWS bileşenlerinden her birini (yeraltı suları, toprak nemi, yüzei suları vb.) belirleyebilmede yetersiz kalmaktadır. Çünkü GRACE sonuçları, su kolonlarının dikey bileşenlerinin tümünü temsil eder. Bu bileşenleri belirlenebilmesi için, uydu ve yersel gözlemleri birleştiren, küresel, yüksek çözünürlüklü, neredeyse gerçek zamanlı, atmosferden bağımsız, karasal yüzei modelleme sistemi olan GLDAS (Global Land Data Assimilation System) geliştirilmiştir [4]. GLDAS, toprak suyu dinamiklerini, bitki psikolojisini, mikrometeorolojiyi anlamak ve atmosfer-biyosfer-hidrosfer etkileşimlerini kontrol altında tutarak, toprak, bitki ve atmosfer arasındaki kütle, enerji ve ivmelenmeyi gerçek zamanlı simülasyonlarla modeller [4]. Bu anlamda GRACE ve GLDAS'ın beraber kullanıldığı [3], [5], [6], GRACE bileşenlerini (yeraltı suyu, yüzei suları vb.) model verileri ile ayırmak mümkün olmaktadır.

GRACE ile bölgesel ölçekte TWS değişimlerinin belirlenmesinde; stokes katsayıları şeklinde yayımlanan Seviye-2 verilerinin aylık çözümleri, minimum derecesi 60 olarak yaklaşık 333 km, maksimum derecesi 96 olarak 208 km yersel çözünürlüğe karşılık gelmektedir. Bu sebeple GRACE özellikle bölgesel su hacmini belirleme çalışmalarında 200 000 km<sup>2</sup> ve daha büyük alanlarda çözüm sağlar [7]. Bunun yanında GRACE gravite alanı çözümleri; uydunun ölçme sistemi, yer izi, zamansal çözünürlüğü, veri işlemede kullanılan arka plan modeller ve stratejiler, uydunun manevrası gibi birçok faktörden kaynaklanan hataları içermektedir [8]. Özellikle bölgesel su hacmi belirleme çalışmalarında, bu hatalar ileri analizlerle giderildikten sonra gerçek su sinyaline erişilebilir. En belirgin olanları ise, GRACE düşük dereceli katsayılarındaki ( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ ,  $C_{20}$ ), belirli açınım ve dereceli katsayılar arasındaki (korelasyonlu katsayılar) ve yüksek dereceli katsayılardaki (yumuşatma) hatalardır [9], [10], [11].

GRACE ile bölgesel ölçekte su değişimlerinin tespiti üzerine yapılan ilk çalışma, 1998 yılında John Wahr'ın, Gaussian yumuşatmasına ( $W_n$ ) dayanan bir konumsal ortalama metodunu kullanarak Manaus ve Amazon bölgesinde hidrolojik sinyallerin keşfinin incelenmesidir [12]. Rodell ve Famiglietti (2001)'in, Illinois bölgesi üzerinde yaptıkları çalışmada, GRACE ile elde edilen karasal su depolarının etki alanı araştırılmış 200 000 km<sup>2</sup>'den daha büyük alanlarda çözüm sağladığını tespit etmişlerdir. Swenson ve Wahr (2002)'de yılındaki çalışmasında ise, bölgesel su tespiti için ortalama kernel yöntemleri, Missuori Nehir Havzası üzerinde uygulanmış ve ortalama kernel metodu ile çalışma bölgesinin tüm dünyadan izolasyonu yapılarak, hem GRACE gözlemlerinden hem de bölge dışından gelen yanıltıcı sinyallerden kaynaklanan hataları minimize edilerek, bir bölgedeki karasal su değişimleri arzu edilen hassasiyette elde edilmiştir [13]. Bakker'in 2005 yılındaki tez çalışmasında, Zambezi Havzası uygulama bölgesi olarak belirlenmiş, havza su depolarındaki değişimler global, ROW (Rest of the World), ortalama kernel yöntemleri ve STREAM hidrolojik model çıktıları ile yöntemlerin doğrulukları kıyaslanmış ve havzadaki su değişimini veren en yakın yöntemler tartışılmıştır [14]. 2008 yılında Syed ve arkadaşları tarafından dünyanın önde gelen nehir havzaları üzerinde yaptıkları çalışmada, yersel su depolarındaki değişimler, hem GRACE hem de karasal yüzey modeli GLDAS ile elde edilerek kıyaslanmış, GLDAS ile yersel su depoları bileşenlerinin, yersel su depolarındaki değişimlerinde nasıl kullanıldıkları belirtilmiştir. Çalışma GRACE ile GLDAS sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduklarını göstermiştir [3]. Rodell ve arkadaşlarının 2009 yılındaki çalışmasında ise Hindistan'ın Punjab, Haryana, Delhi, Rajasthan şehirlerini içine alan bölgede, GRACE ortalama kernel yöntemiyle elde edilen yersel su depolarındaki değişim, GLDAS karasal yüzey modelinden elde edilen yersel su depolarındaki değişim ile karşılaştırılmış ve bölgedeki yeraltı suyunun tahmini yapılmıştır [5]. 2011 yılında Taogdamrongsub ve arkadaşları güney Asya'nın su potansiyelini, hem GRACE hem de GLDAS verileri ile değerlendirdikleri çalışmada, GRACE ve GLDAS sonuçlarının, GRACE sonuçları ile yağış verilerinin, GRACE sonuçları ile sıcaklık verilerinin, GRACE sonuçları ile kar suyu yüksekliklerinin birbirleriyle uyumlu olduklarını tespit etmişlerdir [15].

Yukarıda kısaca özetlenen tüm çalışmalar, GRACE ile bölgesel su değişimlerinin yüksek doğrulukta izlenebildiğini göstermektedir.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Çalışmanın temel amaçları;

- Türkiye bölgesel su değişiminin belirlenebilmesi için, yaygın olarak kullanılan değerlendirme yöntemlerinden birinin seçilmesi hedeflenmiştir.
- Test bölgesi Zambezi Nehir Havzası için farklı merkezlerin veri setleri, UT-CSR ve ICGEM (International Centre for Global Earth Model) kfilter-DDK ile CNES/GRGS interaktif arayüz ile hesaplanmış bölgesel su değişimleri kullanılarak elde edilen, bölgesel su depolarındaki değişim sonuçlarını karşılaştırmak ve farklı veri merkezlerini sonuçları ile üretilen sonuçların kıyaslanması, hedeflenmiştir.
- Test bölgesi Zambezi Havzası için GLDAS karasal yüzey model verileri (toprak nemi, bitki su muhtevası vb.) kullanılarak elde edilecek bölgesel su değişimi ile GRACE veri merkezlerinden elde edilen sonuçları karşılaştırılması ve kullanılan ileri analiz yöntemlerinin tutarlılığının incelenmesi hedeflenmiştir.
- UT-CSR, kfilter-DDK, CNES/GRGS ve GLDAS karasal yüzey verileri (toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer yüksekliği vb.) kullanılarak Türkiye bölgesel su değişiminin tespit edilmesi amaçlanmıştır.
- Türkiye su depolarındaki uzun dönemli değişimin trendinin belirlenmesi ve kritik noktalarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Zambezi Nehir Havzasında daha önceden yapılan çalışmalardan, ortak zaman dilimi Şubat 2003 ile Şubat 2006 arasında 60'ncı dereceye kadar küresel harmoniklere açılmış, UT-CSR, RL05 aylık küresel harmonik katsayıları ve UT-CSR verilerine ileri analizler uygulanarak, yine 60'nci derece kadar açılmış, kfilter-DDK2 küresel harmonik katsayıları ve bu sonuçları karşılaştırmak üzere CNES/GRGS interaktif arayüz ile elde edilen TWS verileri ve de aynı zaman periyodundaki GLDAS/Noah (toprak nemi, bitki su muhtevası) hidroloji modeli kullanılmıştır. Buna ek olarak Zambezi Havzasında benzer değerlendirmelerin yapıldığı [14], [16], [17], çalışmalarının sonuçları karşılaştırma kriterleri olarak belirlenmiştir.

Türkiye bölgesel su depolarındaki değişimi (TWS) için ortak zaman dilimi Ocak 2004 ile Haziran 2014 arasında 60'ncı dereceye kadar açılmış UT-CSR, RL05 aylık küresel harmonik katsayıları ve UT-CSR verilerine ileri analizler uygulanarak, yine 60'ncı derece kadar açılmış, kfilter-DDK3 küresel harmonik katsayıları ve bu sonuçları karşılaştırmak üzere CNES/GRGS interaktif arayüz ile elde edilen TWS verileri ve de aynı zaman periyodundaki GLDAS/Noah (toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer su yüksekliği) hidroloji modeli kullanılmıştır.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, GRACE uydu görevi, ölçme sistemi, veri yapıları, GRACE ile bölgesel su depolarındaki değişim (TWS) hesabında kullanılan temel bağıntılar ve GRACE, TWS çözümlerini etkileyen faktörler açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, GLDAS karasal yüzey modeli ve GLDAS veri yapıları açıklanmıştır.

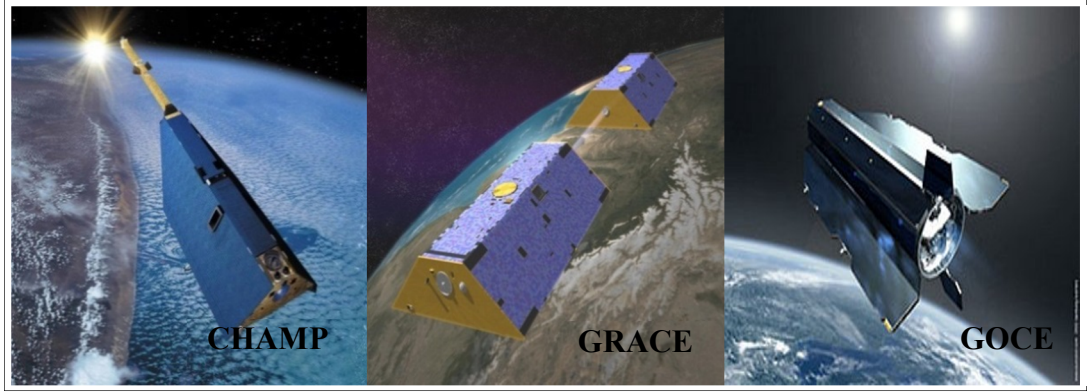
Dördüncü bölümde ise çalışmada kullanılan tüm verilerin özellikleri ve veri işleme adımları anlatılmaktadır.

Beşinci bölümde, test bölgesi olarak belirlenen Zambezi Havzası tanıtılmıştır. Tüm veri merkezlerinden elde edilen Zambezi su depolarındaki değişim hesaplanmış ve bu değerler literatürle karşılaştırılmıştır. Yine bu bölümde, Türkiye'nin su depolarındaki değişim farklı veri merkezleri üzerinden hesaplanmış, ayrıca bu değişime etki eden faktörler değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, tez çalışması ışığında bazı öneriler sunulmuştur.

## 2. GRACE (GRAVITY RECOVERY AND CLIMATE EXPERIMENT)

Dünya topoğrafyası, dağların, ovaların, derin vadilerin, okyanusların, buzulların oluşturduğu, kütle varyasyonları bakımından değişken bir yapıya sahiptir. Bu farklılıklar dünyanın yüzey yoğunluğunun değişken olduğunu gösterir. Yoğunluktaki zamana bağlı dalgalanmalar, dünya çekim alanında küçük değişimlere sebep olur. Son on yılda dünya çekim alanındaki zamansal değişimleri global ve bölgesel ölçekte, yüksek doğrulukta belirlemek amaçlı pek çok projeye imza atılmıştır. Bu projeler kapsamında, CHAMP, GRACE ve GOCE yeni nesil gravite alanı belirleme uyduları geliştirilmiştir [18].



Şekil 2.1: Yeni nesil gravite alanı belirleme uyduları.

Temmuz 2000'de dünyanın çekim alanını belirlemek için geliştirilmiş ilk uydu CHAMP, uydu üzerinde etkili olan yerçekiminden ya da yerçekimi dışındaki kuvvetlerden kaynaklanan değişimleri ölçmek adına uyduya konumlandırılmış ivmeölçerlere sahiptir. CHAMP, yüksek-alçak uydudan uyduya izleme metodu (hl-SST) ile gravite alanının uzun dalga boylu bileşenlerini düşük dereceli harmoniklerle belirler. 2002 yılında CHAMP'in devamı niteliğindeki GRACE uyduları, hem alçak-alçak uydudan uyduya izleme (ll-SST) metodu, hem de yüksek-alçak uydudan uyduya izleme metodu (hl-SST) ile gözlem yapabilen, aynı yörüngede birbirini izleyen ve çekim gücü farklılığının yarattığı yörünge bozulmalarını gözleyen, ikiz uydudan oluşur. 2008 yılında ise GOCE, yeryuvarının gravite alanını, hem yüksek-alçak uydudan uyduya izleme metodu (hl-SST) hem de uydu çekim gradyometri (SGG) tekniği ile ölçerek, harmonik açılım derecesi 250, doğruluğu  $\pm 1$  cm ile

yüksek frekanslı çekim alanı verileri sağlar. Bu bağlamda CHAMP, GRACE ve GOCE birbirlerini bütünleyici yapıdadırlar [19], [20].

GRACE, dünyanın çekim alanı ölçmelerini detaylandırmak ve dünya atmosferi için iyi bir profil oluşturarak kara, deniz ve buzullar üzerindeki su rezervuarlarını araştırmak üzere, 17 Mart 2002 tarihinde fırlatılmıştır [2]. GRACE ile ilk kez tek bir kaynaktan, dünyanın yerçekimi alanı yüksek hassasiyette belirlenerek, jeoid haritalarını detaylandırmak mümkün oldu. Çünkü GRACE doğrudan yüzey kütle değişimleri ile ilgili olduğundan dünyanın çekim alanındaki değişimleri belirlemektedir.

GRACE ölçmeleri ile, aşağıdaki çalışmaları yapmak mümkündür [21], [22].

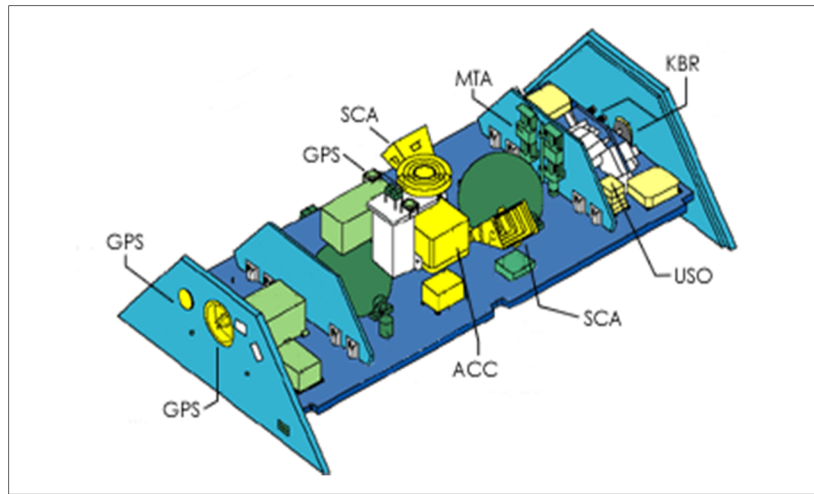
- Okyanus yüzey akıntıları ve okyanus ısı transferini,
- Okyanus sıcaklık ve su kütlesi değişiminden kaynaklanan deniz seviye değişimlerini,
- Okyanus dip basıncı değişimlerini,
- Kutup buzullarının kütle değişimlerini,
- Atmosfer ve okyanus arasındaki kütle değişimlerini,
- Karasal su depolarındaki değişimleri,
- Dünyanın jeomanyetik alanını oluşturan kuvvetleri,
- Dünyanın içsel kuvvetlerini, (tektonik plaka hareketleri, deprem ve volkanik patlamalar) hesaplamak.

GRACE, NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) ve DLR (Deutsche ForSchunsanstalt für Luft und Raumfahrt, Germany) uzay ajanslarının ortaklığında yürütülen bir projedir [2]. Bu çerçevede GRACE uzay araştırmalarını, UT-CSR ve GFZ yürütmektedir. GRACE'in yer segmentleri, ESA (European Space Agency) ile ortaklaşa sağlanır. GRACE, 5 yıllık bir süre için dizayn edilmiş olsa da, şuan hala aktif ve 2015 yılına kadar yörüngesinde kalmayı sürdürecektir [23].

## 2.1. GRACE Ölçme Sistemi

GRACE uyduları, dünya yüzeyinden ~500 km yüksekteki aynı yörünge düzleminde, biri önde diğeri arkada, aralarındaki mesafe yörünge hareketleri süresince sürekli değişim halinde ve ~220 km olmak üzere konumlandırılmış iki eş uydudan oluşur [24]. GRACE ikiz uydularının, yaklaşık 500 km'deki yüksekliği atmosferik sürtünme etkilerinden dolayı her yıl ortalama 2.7 km kadar azalmaktadır [25]. Küresel veri toplama alanı elde etmek üzere, uydulara ekvatorla 89.5°'lik polar eğim açısı seçilmiştir [24].

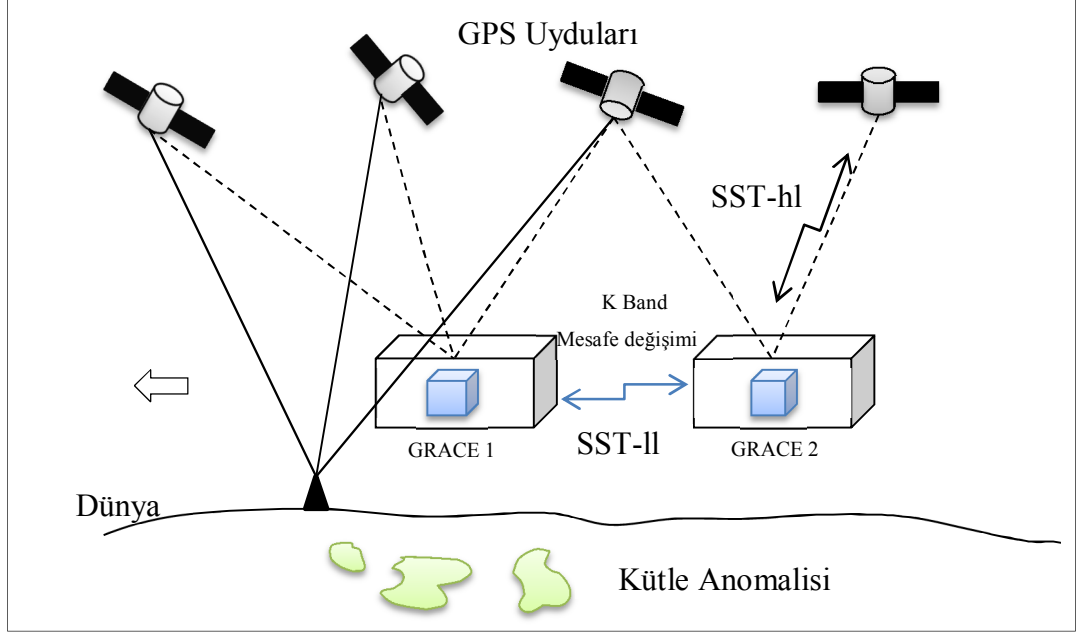
GRACE uydu sisteminde, iki uydu arasındaki mesafe değişimini 10 $\mu$  duyarlılıkta belirleyen ve iyonosfer gecikmesinin modellenmesi için iki farklı frekansı [K-bant (24 Ghz), Ka-bant (32 Ghz)] kullanan KBR uzunluk ölçme sistemi, KBR ölçeri için frekans sağlayan, duyarlılığı çok yüksek USO (Ultra Stable Oscillator) osilatörler, uyduların yıldızlara göre konumunu belirleyen SCA (Star Camera Assembly) yıldız kameraları, uyduları gravite dışında etkileyen etkilere duyarlı ACC (Accelerometer) ivmeölçerler, uydu ivmelenme merkezi ve ivmelenme merkezini ölçen MTA (Mass Trim Assembly) ölçerler, GRACE uydu konumunu belirlemek ve ölçme sistemi zaman senkronizasyonunu sağlayan GPS (Global Position System) ve uydu enerjisini sağlayan GSA (Globalstar Silicon Solar Cell Arrays) panelleri bulunmaktadır [26]. Şekil 2.2'de, GRACE uydu mekanizmasının sensör konfigürasyonu verilmiştir [27].



Şekil 2.2: GRACE uydu mekanizmasının sensör konfigürasyonu.

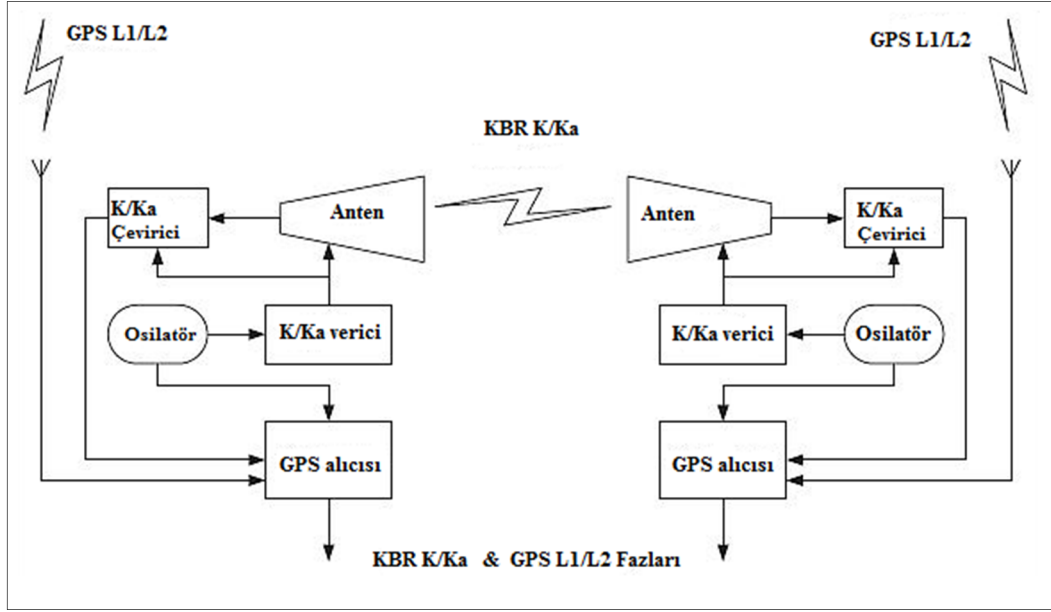


GRACE ölçme prensibi; uydu çifti, güçlü gravite alanı olan bir bölgeden geçerlerken, ilk önce öndeki uydu etkilenir, bu güç onu arkasındaki uydudan uzaklaştırır ve gravitenin değiştiği yere kadar devam eder (Şekil 2.3). Gravitenin değiştiği yerden geçerken, arkadaki uydu öndeki uyduya yaklaşır. Böylece uydular arası sürekli değişim meydana gelir [28].



Şekil 2.3: GRACE ölçme sistemi.

İki uydu arasında değişen bu uzaklık gözle görülemeyecek kadar küçüktür ve saniyede 1 mikrometreden daha küçük değişimlere duyarlı “microwave ranging system” (KBR) ile mesafedeki çok küçük değişimler (Şekil 2.4), çok yüksek doğrulukta belirlenebilmektedir [24]. Antenler uydulardan gelen taşıyıcı fazı almak ve iletmek için kullanılır. Antenlerden gelen ve giden sinyaller arasındaki çapraz karışmayı önlemek için frekanslar, K/Ka çeviricide 500 KHz'a kaydırılır. Gelen ve giden sinyaller için osilatörler aracılığı ile referans sinyali oluşturulur ve alınan referans sinyalinin kombinasyonu geçen sinyale eşitlenir. Burada rölatif konum değişiminden kaynaklanan faz kayıklıkları meydana gelir. Her bir uydudan yapılan faz ölçmeleri yer istasyonuna iletilir ve osilatör hataları düzeltilir. Ayrıca İyonosfer etkilerini kaldırmak için her bir uydu K (24 GHz) ve Ka (32 GHz) olmak üzere iki taşıyıcı faza sahiptir. Bu aşamada Seviye-0 verileri elde edilir [29].



Şekil 2.4: K-bant mesafe değişimi ölçme mekanizması.

## 2.2. GRACE Veri Sistemi

Bu bölümde, Seviye-0 verilerinin adım adım işlenmesiyle oluşan gravite alanını belirleyen küresel harmonik katsayılarının (Seviye-2) elde edilmesi anlatılmaktadır [30].

GRACE SDS (Science Data System), dünyanın aylık gravite modellerini belirlemek üzere dizayn edilmiş olup, sistem geliştirme, veri işleme ve arşivleme işlemleri JPL, GFZ ve UT-CSR arasında paylaştırılmıştır. Bu veriler Seviye-0, Seviye-1, Seviye-2 ve Seviye-3 (maskon) olmak üzere 4 veri setinden oluşmaktadır.

Seviye-0 veriler, işlenmemiş ham uydu telemetre verileri olup, Almanya'da DLR merkezi tarafından toplanmakta ve işlenmek üzere SDS merkezlerine gönderilmektedir. Bu veride, K-bant ham faz verileri, GPS yörünge bilgileri, ivmeölçer verileri bulunmaktadır [31].

Seviye-1 verileri, Seviye-0 verilerinden işlenmiş, GRACE uyduları için başlangıç efemeris bilgileri ve GPS izleme verileri ile birlikte, uydular arası mesafe değişimleri, mesafe ivmelenmeleri ve çekim dışı ivmelenmelerin kaydedildiği veriler bulunmaktadır. Seviye-1 verileri, Seviye-1A ve Seviye-1B olmak üzere ikiye ayrılır. Seviye-1A ürünleri, Seviye-0 verilerine sensör kalibrasyon faktörünün eklenmesiyle Seviye-0 verilerinin binary formatına dönüştürülmüş halidir. Seviye-1B ürünleri,

yine Seviye-0 verilerine zaman bilgisinin eklendiği, işlenmiş telemetre verilerinden oluşur [31], [32].

Seviye-2 verileri, Seviye-1 ürünlerinin işlenmesiyle elde edilmiş, gravite alanını belirleyen küresel harmonik katsayıları ( $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ ) ve bunların standart sapmalarından oluşur. Bu katsayılar oluşturulmadan önce GRACE uydularının, yere yakın olmasından kaynaklanan atmosferik etkiler, ECMWF (European Center of Medium Range Weather Forecasts) tarafından 6 saatlik aralıklarla elde edilen değişimleri modellenerek, GRACE uydular arası mesafelerden kaldırılmıştır [32], [31].

Seviye-3 verileri, üç farklı veri işleme merkezlerinde JPL, GFZ ve UT-CSR tüm dünya için hesaplanmış, farklı konumsal çözünürlükteki ( $1^\circ \times 1^\circ$ ,  $4^\circ \times 4^\circ$ , vb.) gridler (maskon) halinde, farklı yumuşatma ve korelasyon giderici filtreler kullanılarak uydu ölçme hataları giderilmiş ve cm hassasiyetindeki eşdeğer su yükseklikleri verileridir [33].

Bunlara ek olarak, CNES/GRGS ve DEOS merkezlerinde hesaplanmış Seviye-2 ve Seviye-3 verileri de bulunmaktadır. Tüm bu veriler standart bir dosya formatında yayınlanmaktadır.

“GSM-2\_2004183\_2004213\_0031\_UT-CSR\_0060\_0005.gz”, gibi bir dosyada ‘GSM-2’, Seviye-2 ürünü olup gravite alanı çözümlerini içeren küresel harmonik katsayıları ve bunların standart sapmalarını, ‘2004183\_2004213’, ölçme aralığı olup, 2004 yılının 183. gününü ve 213. gününü kapsadığını, ‘0031’ verisi olan gün sayısını, ‘UT-CSR’ veri işleme merkezinin kısa adını, ‘0060’ çözümünü maksimum derecesini, ‘0005’ sürümü (Release 05), ‘.gz’ dosya türünü göstermektedir.

### 2.3. GRACE ile Gravite Alanı Çözümleri

Dünya topoğrafyasındaki kütlelerin olağandışı yoğunlaştığı bölgeler, dünya yüzeyinin düzgün olmamasına sebep olan anomalileri meydana getirir. Anomaliler dünya yüzeyi üzerinde çekim kuvvetinin değişimlerini gösterir. Öyle ki; dünyanın çekim alanı jeoidin şekli itibariyle tarif edilebilir [12].

$$N(\theta, \phi) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) (C_{nm} \cos m\phi + S_{nm} \sin m\phi) \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'deki,  $N$  jeoidi,  $a$  Dünyanın yarıçapını,  $\theta$  enlemi,  $\phi$  boylamı,  $P_{nm}$  normalize edilmiş Legendre fonksiyonunu,  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  yer gravite alanındaki dağılım ve düzensizlikleri gösteren küresel harmonik katsayılarını,  $n$  harmonik katsayıların açılımın derecesini,  $m$  ise sırasını ifade etmektedir.

Dünya yüzeyi düzgün olmamasına rağmen, yüzeydeki pek çok değişimler uzun periyotlarda meydana gelir. Çekim alanındaki uzun dönemli değişimler, dünya dönüş retardasyonu, dünya merkezindeki kütle kaymaları ve kaya yoğunluğu değişimi gibi dünya içerisindeki, fiziksel süreçlerden kaynaklanır. Uzun dönemli değişimler düşünüldüğünde, yerçekimi etkisi uzun bir süre aynı kalır. Diğer taraftan gök cisimlerinin ve kütle hareketleri ile dünya yüzey deformasyonlarının sebep olduğu okyanus ve dünya gelgiti, atmosferik basıncın deformasyonu, kutup hareketlenmeleri, depremler ve su kaynaklarındaki değişimler, çekim alanında zamana bağlı etkilerin meydana gelmesine sebep olur. Bu kısa vadeli kütle değişimleri, yerçekiminin zaman değişkenli etkilerini yansıtır. Zaman değişkenli bu etkiler ise, jeoid değişimi  $\Delta N$  ile açıklanabilir. Eşitlik (2.2)'de  $\Delta C_{nm}$ ,  $\Delta S_{nm}$  küresel harmonik jeoid katsayılarının değişimini ifade etmektedir [12].

$$\Delta N(\theta, \phi) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) (\Delta C_{nm} \cos m\phi + \Delta S_{nm} \sin m\phi) \quad (2.2)$$

GRACE, dünya çekim alanını, çekim alanındaki değişimleri, bu değişimlerin kaynaklarını belirler. Bu yüzden, dünya yüzeyindeki kütle dağılımının tüm kaynaklarından etkilenir [24]. Dünya yüzeyindeki kütlelerin yeniden dağılışı, yoğunluk değişimlerine  $\Delta\rho(r, \theta, \phi)$ , yoğunluk değişimi ise jeoid değişimlerine neden olur. Yoğunluğa bağlı küresel harmonik katsayıları aşağıdaki gibidir [11], [12].

$$\begin{cases} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{cases} = \frac{3}{4\pi a \rho_{ort} (2n+1)} \quad (2.3)$$

$$\int \Delta\rho(r, \theta, \phi) \left(\frac{r}{a}\right)^{n+2} P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi dr$$

Eşitlik (2.3)'teki  $\rho_{ort}$  dünyanın ortalama yoğunluğu ( $\sim 5517 \text{ kg/m}^3$ ),  $\Delta\rho(r, \theta, \phi)$  ise GRACE uygulamalarında dünya yüzeyinden  $H$  kadar yükseklikte atmosferi,

okyanusu, buzul zirvelerini, kara üzerindeki ve altındaki su potansiyelini içerisine alan ~10-15 km'lik ince bir tabakanın yoğunluğudur.

Bu bağlamda yüzey yoğunluk değişimi  $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ ;

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \int_{\text{ince tabaka}} \Delta\rho(r, \theta, \phi) dr \quad (2.4)$$

eşitlik (2.4) şeklinde ifade edilir [11], [12]. Yüzey kütlelerinin çekim etkilerinin direkt olarak jeoide katkısını ise, eşitlik (2.5) şeklinde ifade edilir.

$$\left. \begin{matrix} \{\Delta C_{nm}\} \\ \{\Delta S_{nm}\} \end{matrix} \right\}_{\text{yer kütlesi}} = \frac{3}{4\pi a \rho_{ort} (2n + 1)} \quad (2.5)$$

$$\int \Delta\sigma(\theta, \phi) P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi$$

Yüzey kütleleri kendi kütle etkilerinden ziyade katı yere yükleme yaparak onun deforme olmasına neden olur. Eşitlik (2.5)'deki bu yüklenmeden kaynaklanan etkinin jeoide katkısının belirlenebilmesi için  $k_n$  (love number) yüklenme sayısının bilinmesi gerekir. Bu sayı Han ve Wahr tarafından  $n < 200$ 'e kadar olan bazı terimleri hesaplanmış olup, hesaplanmayan ara terimleri lineer enterpolasyon ile bulunabilir [34].

Tablo 2.1: ' $k_n$ ' Yüklenme katsayısı.

n	0	1	2	3	4	5	...	100	150	200
$k_n$	0	0,027	-0,303	-0,194	-0,132	-0,104	...	-0,014	-0,010	-0,007

Bu sebeple eşitlik (2.5),  $k_n$  yüklenme katsayısı ile çarpılarak;

$$\left. \begin{matrix} \{\Delta C_{nm}\} \\ \{\Delta S_{nm}\} \end{matrix} \right\}_{\text{yer kütlesi}} = \frac{3k_n}{4\pi a \rho_{ort} (2n + 1)} \quad (2.6)$$

$$\int \Delta\sigma(\theta, \phi) P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi$$

eşitlik (2.6) elde edilir. (2.5) ve (2.6) eşitliklerin toplamları, toplam jeoid değişim katsayılarını verir [11], [12].

$$\begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix}_{y.kütlesi} + \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix}_{k.yer} \quad (2.7)$$

Bu toplam küresel harmonik katsayıları cinsinden eşitlik (2.8) gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{3(1+k_n)}{4\pi a \rho_{ort}(2n+1)} \int \Delta\sigma(\theta, \phi) \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.8)$$

Yüzey yoğunluk değişimi  $\Delta\sigma$ , küresel harmonik katsayılarının toplamı cinsinden yazılabilir.  $\hat{C}_{nm}$ ,  $\hat{S}_{nm}$  yüzey yoğunluk değişimlerini ifade eden stokes katsayıları olmak üzere [11], [12];

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) (\Delta\hat{C}_{nm} \cos m\phi + \Delta\hat{S}_{nm} \sin m\phi) \quad (2.9)$$

Kütle değişiminin, suyun ( $\rho_{su}=1000 \text{ kg/m}^3$ ) zamana bağlı değişimlerinden kaynaklandığı düşünülürse, yüzey yoğunluk değişiminin su yoğunluğuna bölünmesiyle eşdeğer su yüksekliğine ulaşılır [11], [12].  $\Delta\sigma/\rho_{su}$  ;

$$\Delta h(\theta, \phi) = \frac{a}{\rho_{su}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) (\Delta\hat{C}_{nm} \cos m\phi + \Delta\hat{S}_{nm} \sin m\phi) \quad (2.10)$$

eşitlik (2.10) eşdeğer su yüksekliğinin küresel harmonik katsayılarına açılmasıyla eşitlik (2.11) elde edilir [11], [12].

$$\begin{Bmatrix} \Delta\hat{C}_{nm} \\ \Delta\hat{S}_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{a}{4\pi\rho_{su}} \int \Delta h(\theta, \phi) P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.11)$$

Jeoid ve eşdeğer su yüksekliği arasındaki ilişki (2.8) ve (2.11) eşitliklerinin kombinasyonu ile bulunur [11], [12].

$$\begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{3\rho_{su} (1 + k_n)}{a\rho_{ort} (2n + 1)} \begin{Bmatrix} \Delta \hat{C}_{nm} \\ \Delta \hat{S}_{nm} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta \hat{C}_{nm} \\ \Delta \hat{S}_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{a\rho_{ort} (2n + 1)}{3\rho_{su} (1 + k_n)} \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Jeoidin küresel harmonik katsayılarının değişimlerinden, eşdeğer su yükseklik değişimi hesaplanır [11], [12], [35].

$$\Delta h(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ort}}{3\rho_{su}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) \frac{(2n + 1)}{(1 + k_n)} \begin{pmatrix} \Delta C_{nm} \cos m\phi \\ + \\ \Delta S_{nm} \sin m\phi \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Tam tersi olarak, yüzey yoğunluk değişimi küresel harmonik katsayılarının değişimlerinden de jeoid değişimi hesaplanır [11], [12], [14], [35].

$$\Delta N(\theta, \phi) = \frac{3\rho_{su}}{a\rho_{ort}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) \frac{(1 + k_n)}{(2n + 1)} \begin{pmatrix} \Delta \hat{C}_{nm} \cos m\phi \\ + \\ \Delta \hat{S}_{nm} \sin m\phi \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Yukarıda bahsedildiği üzere, yerküre üzerindeki herhangi bir konumsal öge küresel harmoniklerin toplamları şeklinde ifade edilebilmektedir. Çekim alanındaki değişimleri tanımlamak üzere GRACE'in aylık periyotlarla yayınladığı küresel harmonik katsayılar, uydu ölçme hataları ve artan açınım derecesi yüzünden katsayılar modellemekten kaynaklanan sistematik hatalar vardır. Bu sebeple, 1998 yılında John Wahr, GRACE katsayılarından yüzey kütle değişimlerinin nasıl belirlendiğini, konumsal ortalama metodu ile göstermiştir. Jekeli'nin Gaussian yumuşatmasına ( $W_n$ ) dayanan konumsal ortalama yöntemi, Wahr tarafından, Manaus ve Amazon bölgesinde uygulayarak, hidrolojik sinyallerin keşfi üzerine yapılan ilk çalışma olarak literatürde yer almıştır.

Gaussian fonksiyonu açınım derecesine bağlı isotropik bir filtredir ve  $\Delta\bar{\sigma}$  yüzey kütle anomalisi,  $r/2$  yumuşatma yarıçapını,  $R$  ortalama yer yarıçapının,  $W_n$  yumuşatma fonksiyonu olmak üzere;

$$\Delta\bar{\sigma}(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{ort}}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{(2n+1)}{(1+k_n)} P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \Delta\hat{C}_{nm} \cos m\phi \\ + \\ \Delta\hat{S}_{nm} \sin m\phi \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{\ln(2)}{(1 - \cos(\frac{r}{2}/R))} \quad (2.17)$$

$$W_0 = \frac{1}{2\pi} \quad (2.18)$$

$$W_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right] \quad (2.19)$$

$$W_n = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (2.20)$$

eşitlikleri ile hesaplanır [36].

Ancak konumsal ortalama metodu çalışma bölgesini tam olarak izole etmekte yetersiz kalmış, yumuşatma yarıçapına bağlı olarak çalışma bölgesi dışından, bölgeye sinyal sızıntılarının olduğunu göstermiştir.

GRACE küresel harmonik katsayılarındaki uydu ölçme hataları, uydu yörünge hatalarını, osilator hatalarını, ivmeölçer hatalarını, uydular arası mesafedeki sistem gürültü hatalarını içerirken, artan açınım derecesi ise GRACE konumsal çözünürlüğünü etkileyen hatalardandır. Konumsal ortalama metodu ile bu hataların yüzey kütle yoğunluğuna etkileri azaltılsa bile tamamen yok edilemez. Bu sebeple, Swenson ve Wahr (2002)'de, hem bölgeyi en iyi şekilde tüm dünyadan izole edebilen hem de uydu ölçme ve sızıntı hatalarını minimize edebilen, konumsal ortalamalı kernel yöntemini geliştirmiştir. Bu yaklaşımda öncelikle bölge alanı  $\Omega_{bölge}$ 'nin belirlenmesi ve bölgeyi tanımlayan  $\vartheta(\theta, \phi)$ 'nin tanımlanması gerekir.

$$\Delta\bar{\sigma}_{bölge} = \frac{1}{\Omega_{bölge}} \int \Delta\sigma(\theta, \phi) \vartheta(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.21)$$

Denklemdaki  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$  katı açı elementleridir.  $\vartheta(\theta, \phi)$ 'nin küre üzerindeki integrali  $\Omega$ , ilgili bölge alanının açısal değerini verir [13].



$$\vartheta(\theta, \phi) = \begin{cases} 0 & \text{bölge dışında} \\ 1 & \text{bölge içinde} \end{cases} \quad (2.22)$$

$\vartheta(\theta, \phi)$ , bölgeyi temsil eden asıl fonksiyon olup, bölge içerisinde 1, bölge dışında ise 0 değerini alır.  $\vartheta_{nm}^C$  ve  $\vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmonikleridir [13].

$$\begin{Bmatrix} \vartheta_{nm}^C \\ \vartheta_{nm}^S \end{Bmatrix} = \int \vartheta(\theta, \phi) P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} d\Omega \quad (2.23)$$

$W_{nm}^C$ ,  $W_{nm}^S$  ağırlıklandırılmış bölgesel küresel harmonikleri,  $W_n$  Gaussian yumuşatması olup [13],

$$\begin{Bmatrix} W_{nm}^C \\ W_{nm}^S \end{Bmatrix} = 2\pi W_n \begin{Bmatrix} \vartheta_{nm}^C \\ \vartheta_{nm}^S \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

bölge fonksiyonu eşitlik (2.25)'de gösterildiği üzere dünya yüzeyinden hesaplanır.

$$W(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) (W_{nm}^C \cos m\phi + W_{nm}^S \sin m\phi) \quad (2.25)$$

$W_{nm}^C$ ,  $W_{nm}^S$  ağırlıklandırılmış bölgesel küre harmonikleri ile bölge ortalama yüzey kütle yoğunluğu eşitlik (2.26) ile hesaplanır [13].

$$\Delta \bar{\sigma}_{bölge} = \frac{a\rho_{ort}}{3\rho_{su}\Omega_{region}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{(2n+1)}{(1+k_n)} (W_{nm}^C \Delta C_{nm} + W_{nm}^S \Delta S_{nm}) \quad (2.26)$$

Birçok bölgesel su tespiti çalışmalarında [1], [5], [10], [14], [15], [37], [38], eşitliği (2.26) kullanılmıştır. Bölgesel su değişiminden küresel harmonik katsayıları ise eşitlik (2.27) ile elde edilmektedir [15].

$$\begin{cases} \Delta \hat{C}_{nm} \\ \Delta \hat{S}_{nm} \end{cases} = \frac{3\rho_{su}}{4\pi a \rho_{ort}} \frac{(1 + k_n)}{(2n + 1)} \quad (2.27)$$

$$\int \Delta \bar{\sigma}_{bölge}(\theta, \phi) P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{pmatrix} \sin\theta d\theta d\phi$$

## 2.4. GRACE Gravite Çözümlerini Etkileyen Faktörler

GRACE ile elde edilen yüzey kütle tahminlerindeki hata kaynakları, stokes katsayılarından, gravite sinyallerinden, atmosfer ve katı yerden kaynaklanan hatalar olmak üzere sınıflandırılabilir. Stokes katsayılarındaki hatalar, aletsel, ileri analiz ve katlanma hatalarını içermektedir. Konumsal çözünürlüğü birkaç yüz kilometre ile sınırı olan GRACE, yüzey kütle değişimlerini noktasal ölçmelerin aksine konumsal ortalama şeklinde belirler. Bu sebeple, GRACE ile elde edilen yerçekimi sinyallerinden çalışma bölgesini ilgilendiren sinyallerden tam olarak ayırt edilememesi, gravite sinyallerinden kaynaklanan sızıntı hatalarını oluşturur. Atmosfer ya da katı dünyaya ait modellenemeyen kütle değişimleri de direkt olarak su değişim tahminlerini etkileyen hatalardandır [1], [39]. Aşağıda bu hata kaynakları ve çözümleme yaklaşımları anlatılmaktadır.

### 2.4.1. GRACE Uydu Sistemi Çözünürlük Kavramı

Gravite alanı belirlemede en büyük problem dünya topoğrafyasındaki kütlelerin homojen olmayan dağılımlarının, çekim alanı nümerik hesaplamalarında nasıl kullanılacağıdır. Öyle ki, bir noktanın küre üzerinde çekim potansiyeli;

$$V(r, \theta, \phi) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n P_{nm} \cos(\theta) \begin{pmatrix} C_{nm} \cos m\phi \\ + \\ S_{nm} \sin m\phi \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

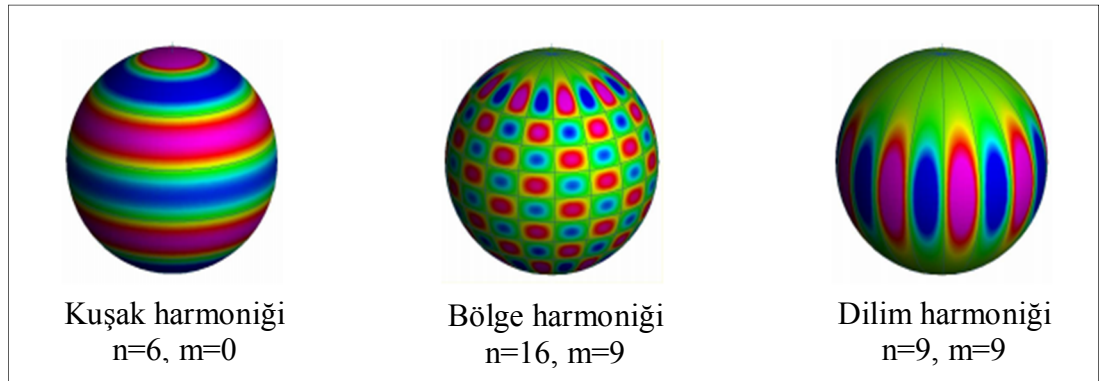
şeklinde hesaplanmaktadır. Dünya topoğrafyasındaki kütlelerinin, dünya çekim alanına etkisinin belirlenebilmesi, (2.28) eşitliğini sonsuza götürür ki, gravite alanı belirlemede böyle bir çözüm matematiksel olarak mümkün değildir.

Kullanıcılara aylık periyotlar şeklinde sunulan GRACE katsayıları, bir dizi noktasal ölçmeler yerine, küresel harmonik katsayıların sonlu bir kümesini oluşturur.

Bu sonlu yaklaşım konumsal çözünürlüğün düşük olmasına, jeoid eşitlik (2.15) ve su kütlesi eşitlik (2.14), değişimlerinin matematiksel hesabındaki açınım derecelerinin kısıtlanmasına sebep olur. Açınımın derecesi ve yersel çözünürlük arasında eşitlik (2.29) gibi bir ilişki vardır.

$$\lambda \approx \frac{20000 \text{ km}}{n_{max} + 0.5} \quad (2.29)$$

Burada,  $n_{max}$  açınım derecesi 50 olan bir çekim alanı modeli, yaklaşık 400 km ve üzerindeki ayrıntıları tanımlayabilir. GRACE gravite alanı modellerinde  $n_{max} \geq 100$  için çok fazla gürültü içerdiğinden, GRACE ölçme sisteminden elde edilen harmonik katsayılarda, 100 derecenin üzerinde yeterli iyileştirme sağlanamamaktadır [11]. Şekil 2.5’de belli derecelerde açılmış küresel harmonik örnekleri görülmektedir [40].



Şekil 2.5: ' $P_{nm} \cos(\theta) \cos m\phi'$  için küresel harmonik örnekleri.

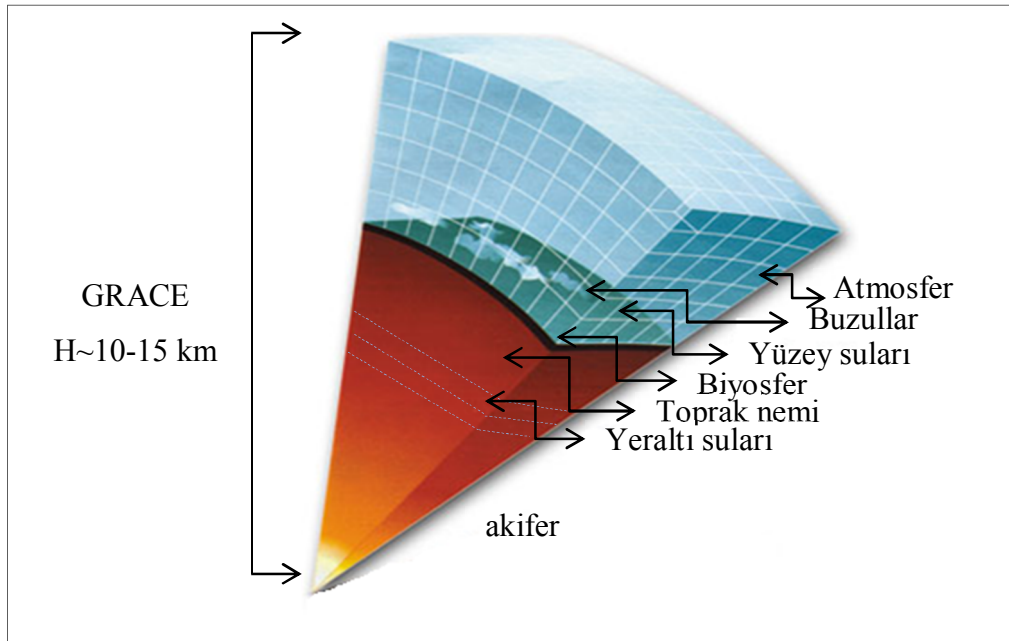
Yine,  $n_{max}$  küresel harmonik katsayılarının açınım derecesine bağlı olarak eşitlik (2.4)’te yoğunluk denklemini sağlayan ‘H’ ince tabakanın, oşinografik, hidrolojik ya da atmosferik uygulamalar için yeterliliği;

$$(n_{max} + 2) \frac{H}{a} \ll 1 \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{r}{a}\right)^{n+2} \approx 1 \quad (2.31)$$

eşitlik (2.30) ve (2.31) ile değerlendirilir. Örneğin  $n_{max}$ , 65 olduğunda,  $H$ , 10 km değerini alır. Seçilen açınım derecesi ve buna karşılık gelen  $H$  değeri, oşinografik ve hidrolojik uygulamalar için yeterli iken, atmosferik uygulamalar için yeterli değildir. Çünkü GRACE, bölgesel su uygulamalarında  $H$ , atmosferi, okyanusu, buzul zirvelerini, kara üzerindeki ve altındaki su potansiyelini içerisine alan ~10-15 km'lik ince bir tabakayı oluşturur [11].

Deniz ve kara üzerindeki kütle değişimleri yüzeyin yaklaşık 1 km içerisinde veya yüzeye çok yakın yerlerde meydana gelen değişimleridir. 1 km'lik ince tabaka için  $n_{max}$ , 65 alındığında, eşitlik (2.30) ~%1 değerini alır.



Şekil 2.6: GRACE uygulamaları için uygun tabaka kalınlığı.

#### 2.4.2. GRACE Harmonik Katsayılarının İyileştirilmesi

GRACE yörünge geometrisi ve ikiz uyduları arasındaki mesafenin oldukça kısa olmasından dolayı, yer kütle merkezini temsil eden birinci derecedeki potansiyel katsayılarını ( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ ) ve yer basıklığını ifade eden ( $C_{20}$ ) katsayılarını yeterli doğrulukta elde edemez. Çünkü GRACE uydularının referans koordinat sistemi (dünyanın şekli) ile yer kütle merkezi farklı olduğundan çekim potansiyeli fonksiyonu, birinci dereceden terimleri içermez.

Basıklık katsayısının ise çeşitli hatalarla yüklü olması, özellikle bu katsayıları kullanılarak belirlenecek su değişim tahminlerini yanıltıcı rol oynarlar. Birinci dereceden potansiyel katsayıları SLR (Satellite Laser Ranging) veya sayısal bir okyanus model çıktısından elde edilen katsayılarla, ( $C_{20}$ ) katsayısı ise yine SLR ile elde edilmiş katsayıları ile değiştirilmelidir [9].

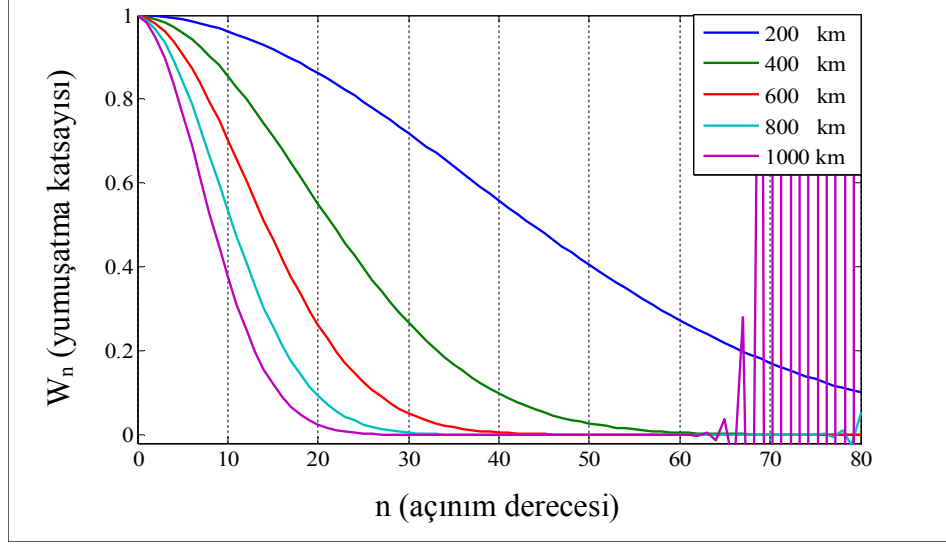
Wahr, 1998 yılında yaptığı çalışma ile yüzey kütle yoğunluk değişimlerini GRACE stokes katsayıları kullanılarak, eşitlik (2.16) ile hesaplamış sonucun artan açınım derecesine bağlı olarak fazla hatalı olduğunu görmüştür. Gravite hesaplamalarında, dünyanın topoğrafyasındaki kütle elementlerinin yarattığı belirsizliği, uygulamada kullanabilmek adına, harmonik açınımın derecesi belli derecelerde kesilerek hesaplanırsa dahi, kısa dalga boylu sinyallerin oluşturduğu yüksek gürültüye sahip katsayıların, yüzey kütle yoğunluğundaki etkileri devam eder. Bu etkileri azaltmak üzere Wahr, konumsal ortalama yöntemini geliştirilmiştir [12]. Böylece katsayıların ağırlığı çözümün derecesi yükseldikçe azalmakta ve yüksek gürültü seviyesine sahip, yüksek dereceli katsayıların su kütlesi hesabına etkisi düşürülmüştür [1], [12].

Konumsal yumuşatma metodu 1981 yılında Jekeli tarafından geliştirilmiş, Guassian yumuşatmasına ( $W_n$ ) dayanan, eşitlik (2.17, 2.18, 2.19, 2.20)'de bahsedilen isotropik metodun kullanımındaki en önemli husus yumuşatma yarıçapının seçimidir. Çalışma bölgesi göz önüne alınarak seçilen, yumuşatma yarıçapı gereğinden büyük seçilirse, bölge kütle sinyallerinin kaybedilmesine ve fazla miktarda yumuşatma yapılarak sızıntı miktarının artmasına, yani bölge dışındaki sinyallerinde çalışma bölgesine sızmasına sebep olur. Küçük seçilmesi ise gürültülü sinyaller üzerinden işlem yapılmasına neden olur [10], [33], [33].

Şekil 2.7'de,  $n_{max}$  60 için yapılacak çalışmada, seçilebilecek en uygun yumuşatma 400 km olarak görülmektedir. 200 km yarıçaplı yumuşatmanın, açınımın maksimum derecesi için yetersiz kaldığı, 600 km, 800 km yarıçaplı yumuşatma yarıçaplarının daha düşük derecelerde iyi sonuç verdiği, 1000 km'nin ise 60'dan büyük açınım derecelerinde bozulduğu görülmektedir. Bununla birlikte, konumsal yumuşatma üzerine geliştirilmiş pek çok yöntem [10], [41], [42], bulunsa da uygulamalarda yaygın ve kolay kullanımı sebebiyle Guassian yumuşatması tez çalışmasında kullanılmıştır.

Uygulamalarda, açınım derecesine en iyi karşılık gelen yumuşatma yarıçapı büyüklüğü direkt olarak çözümlerde kullanılması doğru değildir. Çünkü GRACE

versiyonları (RL02, RL04, RL05) arasında hassasiyet farkı olmakla birlikte, bu filtreye ek olarak aşağıda bahsedilecek korelasyon giderici filtreye uygulanmaktadır. Uygulanacak filtre boyutları için bölge fonksiyonu da göz önünde tutulmalıdır.

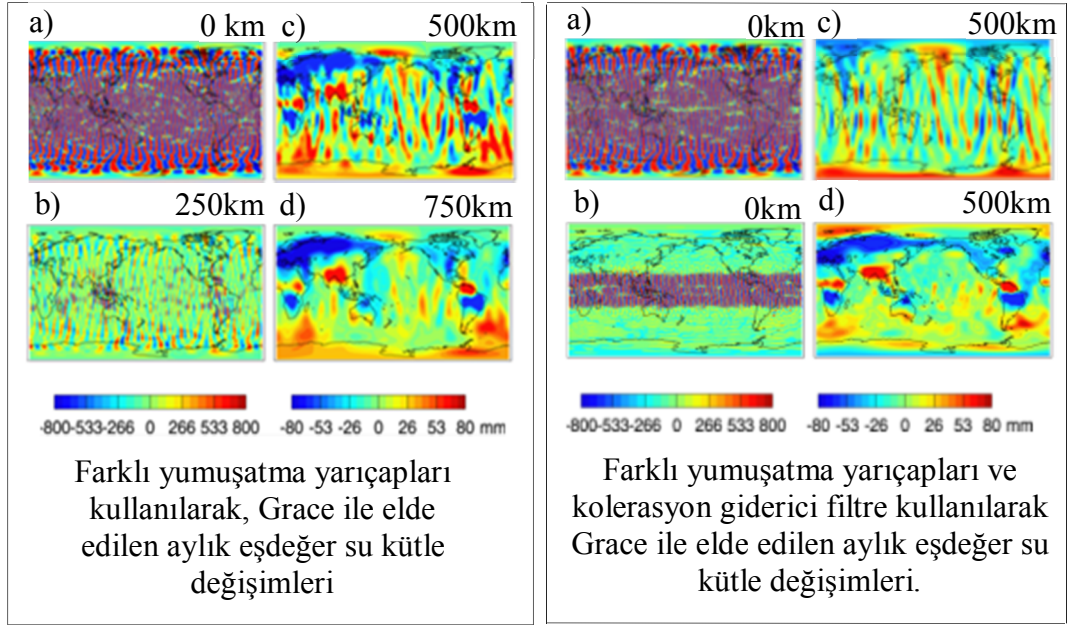


Şekil 2.7: Guassian yumuşatma filtresi.

Chen ve arkadaşları (2005b), konumsal yumuşatma uygulanmamış GRACE verilerinden elde edilen yüzey kütle anomali haritasında, kısa dalga boylu stokes katsayılarındaki gürültüyü ‘stripe’ olarak adlandırılan uzun doğrusal çizgiler şeklinde görmüş, yüksek dereceli stokes katsayılarındaki hataların, yüzey kütlesi ve jeoid yüksekliklerine etkisini belirlemek adına, 400 km ile 2000 km arasında değişen farklı Guassian yumuşatma yarıçapları kullanarak, konumsal yumuşatmanın duyarlılığını test etmiştir. Sonuçta, yumuşatma yarıçapı arttıkça, stripe genliğinin azaldığını, jeofiziksel sinyallerin görünür hale geldiğini tespit etmiştir [43]. Bu çalışmanın ışığında 2006 yılında, Swenson ve Wahr, GRACE çözümlerine uygulanan konumsal yumuşatmanın korelasyonlu hataların giderilmesinde tek başına yeterli olmadığını göstermiştir [8], [44].

GRACE harmonik katsayılarını spektral ortamda incelendiklerinde, 8 ve 8’den büyük açınım sırasındaki katsayılar için, korelasyonu olduğunu görülmüş ve bu korelasyonu gidermek üzere katsayıların tek ve çift terimlerine açınım sırasının  $m \geq 8$  elemanları için düşük dereceli bir polinom belirlenir ve yüksek gürültü içeren katsayılardan farkı alınarak filtrelenir [45].

Şekil 2.8’de [44], eşdeğer su kütlesi hesabındaki, farklı yumuşatma yarıçapları kullanılarak elde edilen soldaki haritalarda, (a) için hiçbir yumuşatma uygulanmayarak, var olan kuzey-güney yönlü hataları, (b), 250 km yumuşatma yarıçapı uygulandığında bu hatanın azaldığı, (c), 500 km ve (d), 750 km yumuşatma yarıçaplı yumuşatmalar uygulandığında stripelerin daha da azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.8: Grace ile elde edilen aylık eşdeğer su kütle değişimleri.

Sağda yer alan eşdeğer su kütlesi hesabında ise, (a) için yine hiçbir filtre uygulanmamış ilk hali, (b) korelasyon filtresi uygulandıktan sonra kalan hataları, (c) için yalnızca 500 km yarıçaplı yumuşatma uygulanmış ve (d) için ise hem korelasyon filtresi hem de 500 km yarıçaplı yumuşatma filtreleri uygulanmış ve stripelerin geopotansiyel sinyalleri ortaya çıkaracak şekilde küçüldüğü görülmüştür. Öyle ki, yumuşatma filtresi ve korelasyon filtresi kombine bir şekilde kullanıldığında, bölgeyi temsil eden sinyallere ulaşılabilir [44].

Swenson ve Wahr’ın 2006 geliştirdiği de-correlation filtresi, stokes katsayılarındaki sistematik hataları giderici bir filtre olarak pek çok çalışmada da [5], [8], [15], kullanımı sebebiyle, tez çalışmasında kullanılan yöntemdir.

### 2.4.3. Gravite Sinyallerinden Kaynaklanan Hatalar

Bölgesel su tespiti çalışmalarında en önemli problem, GRACE ile elde edilen tüm sinyallerden ilgili bölge sinyallerinin ayırt edilebilmesidir. Aylık periyotlar şeklinde yayınlanan GRACE veri setleri, bir dizi noktasal ölçmeler yerine küresel harmonik katsayıların sonlu bir kümesini oluşturan birkaç yüz kilometre karelik alanlarda meydana gelen, ortalama gravite değişimlerini algılayabilmektedir. Bu yüzden ilgili bölge içerisine, hem komşu bölgelerden hem de atmosfer ve katı yerden kaynaklanan yatay ve düşey yönde sinyaller sızarak, yüzey kütle değişimlerini etkiler.

Atmosferden (düşey) kaynaklanan hatalar, ECMWF tarafından 6 saatlik aralıklarla modellenen atmosfer, GRACE stokes katsayıları elde edilmeden önce, GRACE (range-rate) mesafe ölçmelerinden kaldırılarak, atmosfer etkisi katsayılardan uzaklaştırılır. Katı dünyaya ait (düşey) etkiler ise, yeteri kadar modellenememiş PGR (Post Glacier Rebound)'den gelen hatalar oluşturur. PGR, buzul çağın sonunda buzul erimesinden kaynaklanan viskoelastik tepki olarak bilinmektedir. Bu etki, GRACE eşdeğer su yüksekliklerinden modellenerek uzaklaştırılmış olsa da, GRACE ile belirlenen su tahminlerinde, PGR bir hata etmeni değildir. Son olarak komşu bölgelerden gelen (yatay) sızıntı sinyal etkileri, kernel yöntemi ile minimize edilebilmektedir [13].



### 3. GLDAS (GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM)

Uydulardan ya da yüzey gravimetre ile yapılan yerçekimi ölçmeleri, su kütlelerin dikey dağılımları hakkında kesin bilgi veremez. Çünkü çekim alanının zaman değişkenli sinyallerini algılayan GRACE, bu sinyallerin atmosferden, manto içerisindeki kütle değişimlerinden, yüzey sularından, yeraltı sularından kaynaklandığını söyleyemez [6]. GRACE, manto içerisindeki değişimler ihmal edilirse, su depolarındaki değişimlerin toplam dikey bileşenini verir. Bu sebeple farklı hidrolojik evrelerdeki su miktarının belirlenebilmesi, su döngüsü evrelerindeki su geçiş oranlarının sezonsal olarak değerlendirilmesi ve özellikle sınırlı bir ağda yapılabilen toprak nemi, yeraltı suyunun saptanması için lokal yersel ölçmelerin gerekliliği gibi pek çok problem büyük bir bölgenin su potansiyelinin yeterli doğrulukta belirlenmesini zorlaştırır. GRACE'in bu eksikliği, ya lokal olarak yapılmış ölçmelerden, ya da global kara yüzey modellerinden elde edilen verilerle giderilebilmektedir [6].

Yüzey kütle değişimlerine sebep olan bileşenlerin belirlenebilmesi için, uydu ve yersel gözlemleri birleştiren, küresel, yüksek çözünürlüklü, neredeyse gerçek zamanlı, atmosferden bağımsız, karasal yüzey modelleme sistemi olan, GLDAS geliştirilmiştir [4]. GLDAS,  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  ve  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  çözünürlükte karasal yüzeylerin durum (state), (toprak nemi, kar eşdeğer su yüksekliği, bitki su muhtevası) ve akış (flux) (buharlaşma, yeraltı sıcaklık akışı), zaman serilerinden oluşan yüzey verilerini, Mozaik, Noah (National Oceanic and Atmospheric Administration), CLM (Community Land Model), VIC (Variable Infiltration Capacity model) dört arazi yüzey modelinden simüle eder [4].

CLM model, ana teması ekoklimatoloji bitki örtüsünün, doğal ve beşeri değişimlerden nasıl etkilendiğini anlamak, enerji, su, iklim, atmosferik gaz döngüsünü içeren yersel ekosistemlerdir. Hidrolojik döngü, biyokimya ve dinamik bitki örtüsünü içerir. Noah, bitki örtüsünün enerji ve su dengesi üzerindeki etkilerini, 3 katmanlı fiziksel tabanlı kar modelini, geçirgen donmuş toprak değerlerini, basit bir yeraltı suyu modelini ve katman fenolojisini içeren bir modeldir. VIC, kara-atmosfer akışı ve toprak yüzeyindeki su ve enerji dengelerini temel alan bir modeldir. Mosaic model, her bir grid hücrelerini mozaiklere böler ve bu mozaiklerdeki bitki örtüsü tiplerinin dağılımlarını belirler [4].

Bu model verilerine, GLDAS üzerinde Mirador, GrADS ve Giavonni internet erişimli interaktif arayüzlerden ulaşılabilmektedir. Çalışmamızda, kullanım kolaylığı açısından, Giavonni çevrimiçi görselleştirme ve analiz aracı üzerinden sağlanan veriler kullanılmıştır.

Giavonni, tüm dünyanın uzaktan algılama verilerini, herhangi bir veri indirmeksizin görselleştiren GESDISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) tarafından geliştirilmiş, web tabanlı bir uygulamadır.  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  ve  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  konumsal çözünürlükteki gridlerde, dört farklı modele (Mozaik, Noah, CLM, VIC) ait aylık ve 3 saatlik periyotlarla elde edilmiş kara yüzey parametrelerine sahiptir. Kullanıcılar Şekil 3.1’de gösterildiği üzere çalışma bölgesinin iklim, bitki örtüsü, toprak yapısı, coğrafi konumu göz önüne alınarak belirlenecek modelden, seçecekleri parametrelerin HDF, netCDF ve ASCII formatlarındaki değerlerine ulaşabilirler. Ayrıca seçilen bölge üzerinde animasyon, enlem-boylam haritası (zaman-ortalama, zaman-ortalama farklılıklar), korelasyon haritası ve zaman serileri ile çevrimiçi görüntüleme ve analiz yapılabilmektedir [46].

“GLDAS\_NOAH10\_M.001.canopint.Feb2004.G3.input”, Giavonni ASCII formatındaki veri dosyası, ‘GLDAS’, karasal yüzey model ürünü olduğunu, ‘NOAH10’,  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  Noah modelini, ‘canopint’, üst bitki tabakasına ait toplam su muhtevasını, ‘Feb2004’, bu verilerin 2004 yılı şubat ayına ait olduğunu gösterir.

NASA National Aeronautics and Space Administration

Search DISC - GO  
Advanced Search

**Giovanni** - The Bridge Between Data and Science

ABOUT GIOVANNI NEWS INSTANCES FEEDBACK RELEASE NOTES HELP

## Global Land Data Assimilation System 1.0 Degree Monthly Products

Home Remove All

The Global Land Data Assimilation System (GLDAS) is generating a series of land surface state (e.g., soil moisture and surface temperature) and flux (e.g., evaporation and sensible heat flux) products simulated by four land surface models (CLM, Mosaic, Noah and VIC). Current data holdings include a set of 1.0 degree resolution data products from the four models, covering 1979 to the present, and a 0.25 degree data product from the Noah model, covering 2000 to the present. This instance focuses on the 1.0 degree monthly products.

Select:

**Spatial** Çalışma Bölgesinin Seçilmesi

Cursor Coordinates: 88.24219, -20.03906

Area of Interest: West: -180 North: 90 South: -90 East: 180 Update Map

**Parameters** Model Parametrelerinin Seçimi

Display:  Data Product Info  Units

CLM Model (19790101 - 20080501)

Parameter	Data Product Id	Model	Start Date	End Date
<input type="checkbox"/> Average layer 10 soil moisture	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 10 soil temperature	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 1 soil moisture	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 1 soil temperature	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil moisture	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil temperature	GLDAS_CLM10_M.001	CLM Model	1979-01 - 2008-05	

Mosaic Model (19790101 - 20080501)

Parameter	Data Product Id	Model	Start Date	End Date
<input type="checkbox"/> Average layer 1 soil moisture	GLDAS_MOS10_M.001	Mosaic Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil moisture	GLDAS_MOS10_M.001	Mosaic Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 3 soil moisture	GLDAS_MOS10_M.001	Mosaic Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average surface temperature	GLDAS_MOS10_M.001	Mosaic Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Near surface air temperature	GLDAS_MOS10_M.001	Mosaic Model	1979-01 - 2008-05	

Noah Model (19790101 - 20080501)

Parameter	Data Product Id	Model	Start Date	End Date
<input checked="" type="checkbox"/> Average layer 1 soil moisture	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 1 soil temperature	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil moisture	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil temperature	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 3 soil moisture	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 3 soil temperature	GLDAS_NOAH10_M.001	Noah Model	1979-01 - 2008-05	

VIC Model (19790101 - 20080501)

Parameter	Data Product Id	Model	Start Date	End Date
<input checked="" type="checkbox"/> Average layer 1 soil moisture	GLDAS_VIC10_M.001	VIC Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 2 soil moisture	GLDAS_VIC10_M.001	VIC Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Average layer 3 soil moisture	GLDAS_VIC10_M.001	VIC Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Near surface air temperature	GLDAS_VIC10_M.001	VIC Model	1979-01 - 2008-05	
<input type="checkbox"/> Surface evaporation	GLDAS_VIC10_M.001	VIC Model	1979-01 - 2008-05	

**Temporal** Çalışma Aralığının Seçilmesi

Begin Date Year: 2008 Month: Jan (Date Begin: Jan 1979)

End Date Year: 2008 Month: Dec (Date End: May 2009)

Select Visualization: 1 Model Ekran Görüntüsü Seçimi

LatLon map of time-averaged differences  
Animation  
LatLon map, Time-averaged  
Correlation map  
LatLon map of time-averaged differences  
Scatter plot  
Scatter plot, Time-averaged  
Time series

Edit Preferences Visualization Help

Global: Steven J. Kummer@nasa.gov  
Data: web-contact-disc@listserv.gato.nasa.gov

Contact Us

Relevant Release and Important Notices

Şekil 3.1: Giovanni görselleştirme ve analiz aracı.

## 4. VERİ SETLERİ VE METOT

### 4.1. Veri Setleri

Teknas Üniversitesi Uzay Araştırmaları (UT-CSR) merkezi tarafından, aylık gravite alanı çözümlerini, açınım derecesi 60 ve 96 olan, dünya yüzey kütle değişimlerini yansıtan RL04 ve RL05 versiyonlu, küresel harmonik katsayıları üretilerek, kullanıcılara sunulur. UT-CSR ürünleri, K-bant mesafe değişimlerinden, GPS ikili farklardan ve günlük dinamiklerden elde edilir. Tez çalışmasında, Zambezi Havzası için; Şubat 2003 ve Şubat 2006 arasındaki 37 aylık, Türkiye için; Ocak 2004 ve Haziran 2014 arasındaki 126 aylık, UT-CSR RL05, küresel harmonik katsayıları kullanılmıştır.

Yüksek dereceli katsayılardaki gürültü miktarlarının giderilebilmesi için GRACE çözümlerinin, filtrelenmesine ihtiyaç duyulur. En yaygın olarak kullanılan yöntem Guassian yumuşatmasıdır. Ancak Guassian yumuşatması, dünya yüzeyindeki yoğunluk değişimlerini hesaba katmadığından, bazı genlik hatalarına sebep olur. Bunun yanında, jeofizik sinyallerini ve bu sinyallerin gürültüsünü ayırt edebilecek yumuşatma yarıçapının seçimi büyük bir problem oluşturmaktadır [47]. Kusche (2007), özellikle genlikteki sapmalara neden olan, kuzey-güney yönlü (stripe) hataları çözümlerden kaldıran bir filtre geliştirmiştir. Farklı yumuşatma yarıçaplarına sahip olan bu filtre DDK olarak adlandırılıp, DDK1 (530), DDK2 (340), DDK3 (240) olmak üzere ICGEM üzerinden 60 ve 96 açınım derecesinde, Eigen-6c ortalama gravite alanı kullanılarak oluşturulmuş küresel harmonik katsayılar bulunmaktadır. Tez çalışmasında, Zambezi Havzası için; Şubat 2003 ve Şubat 2006 arasındaki 37 aylık, kfilter-DDK2 ve Türkiye için; Ocak 2004 ve Haziran 2014 arasındaki 126 aylık, kfilter-DDK3, ileri analiz teknikleri uygulanmış katsayılar kullanılmıştır.

CNES/GRGS, eşdeğer su yüksekliklerini UT-CSR, GFZ ve JPL veri merkezleri tarafından üretilen küresel harmoniklerden, direkt olarak hesaplayabilen, su değişim tespiti çalışmalarında kullanıcılara karşılaştırma imkânı sağlamak üzere tasarlanmış, bir interaktif arayüzdür. Tez çalışmasında, Zambezi Havzası için; Şubat 2003 ve Şubat 2006 arasındaki 37 aylık, Türkiye için; Ocak 2004 ve Haziran 2014

arasındaki 126 aylık, CNES/GRGS, tüm dünyada en iyi sonuç veren RL03-v1 versiyonlu eşdeğer su yüksekliği değerleri kullanılmıştır.

GLDAS karasal veri asimilasyon sisteminin, Giavonni çevrimiçi görselleştirme ve analiz aracı üzerinden Noah kara hidroloji modelinin çeşitli konumsal ( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) ve zamansal (3 saat, 1 ay) çözünürlükteki verilerinden; Zambezi Havzası için, Şubat 2003 ve Şubat 2006 arasındaki 37 aylık,  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  konumsal çözünürlükte, toprak nemi, bitki su muhtevası, Türkiye için, Ocak 2004 ve Haziran 2014 arasındaki 126 aylık,  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  konumsal çözünürlükte, toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer su yüksekliği verileri kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Zambezi UT-CSR verisi bulunan aylar.

	Oca.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Ara.
2003	○	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
2004	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2005	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2006	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

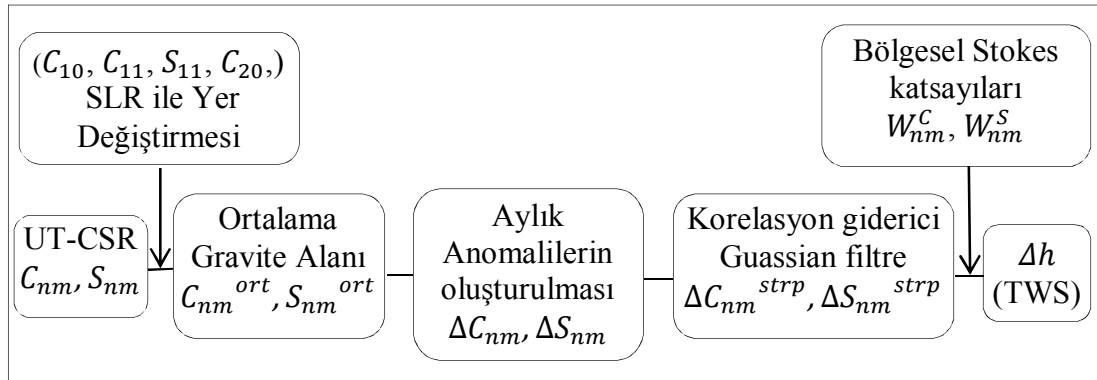
Tablo 4.1’de Zambezi Havzası, Tablo 4.2’de Türkiye için UT-CSR merkezinden alınan, tez çalışması kapsamında verisi bulunan aylar bulunmaktadır. Diğer veri merkezleri ile çalışma periyodu açısından, standardın sağlanması adına UT-CSR ile aynı zaman periyodu kullanılmıştır.

Tablo 4.2: Türkiye UT-CSR verisi bulunan aylar.

	Oca.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Ara.
2004	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2005	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2006	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2007	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2008	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2009	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2010	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2011	○	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
2012	●	●	●	●	○	●	●	●	●	○	●	●
2013	●	●	○	●	●	●	●	○	○	●	●	●
2014	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○

## 4.2. Metot

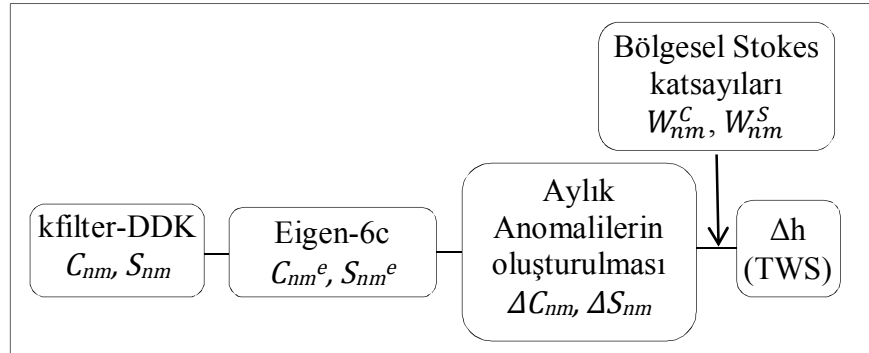
1998 yılında John Wahr, Gaussian yumuşatmasına ( $W_n$ ) dayanan bölgesel su depolarındaki değişimi tespit etmek için kullandığı, konumsal ortalama metodunu, çalışma bölgesini tam olarak izole edememiştir. Bunun üzerine Swenson ve Wahr (2002)'ın çalışmasında, bölgesel su depolarındaki değişimi tespit etmek üzere geliştirdiği kernel yöntemi, çalışma bölgesinin tam olarak belirleyebilmesinin yansira, ölçme ve sızıntı hatalarını minimize edebilmesi ile halen literatürde yaygın olarak kullanılan ve tez çalışmasında kullandığımız kernel yaklaşımı, Şekil 4.1'de UT-CSR üzerinden veri işleme adımları gösterilmektedir.



Şekil 4.1: GRACE veri işleme adımları-1.

- GRACE, düşük derecedeki potansiyel katsayılarını ( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ ) ve yer basıklığını ifade eden ( $C_{20}$ ) katsayılarını yeterli doğrulukta elde edemez. Bu katsayılar SLR ile elde edilen katsayılar ile yer değiştirilir [9].
- Çekim alanının zamansal değişimleri, küresel harmonik katsayılarının uzun dönemli ortalamalarının, her bir aya ait küresel harmonik katsayılarından çıkarılarak elde edilir. Böylece katı dünyaya ait yoğunluk dağılımları dışarıda bırakarak, su kolonlarındaki zamansal değişimler ortaya çıkarılmış olur. Küresel harmonik katsayılarının uzun dönemli ortalamaları, bütün aylara ait küresel harmonik katsayıların ortalaması şeklinde elde edilir [11].
- Aylık anomaliler ise küresel harmonik katsayılarının uzun dönemli ortalamalarının, her bir aya ait küresel harmonik katsayılarından çıkarılması ile elde edilir.

- Swenson ve Wahr (2006)'ın geliştirdiği, 'P4M6' olarak adlandırılan korelasyon giderici (de-correlation) filtresi küresel harmonik katsayılarının açılım sırasının  $m \geq 6$  olan katsayılarına 4. dereceden bir polinom uydurulur ve orijinal serilerden bu polinom çıkartılarak (de-correlation), katsayılara filtreleme uygulanır. Böylece kuzey-güney yöndeki (stripe) hatalar giderilmiş olur.
  - Analiz işleminin bu aşamasında bölgeyi temsil eden küresel harmonik katsayılarının hesaplanması gerekir.
- Eşitlik (2.22) kullanılarak, çalışma bölgesinin içerisinde 1, dışarısında 0 olmak üzere ilgili bölge tüm dünyadan izole edilir.
  - $\vartheta_{nm}^C$  ve  $\vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmoniklerin elde edilebilmesi için dikdörtgenel olmayan bölgelerin çift katlı integralleri, eşitlik (2.23) ile hesaplanır [48].
  - Eşitlik (2.24) ile  $\vartheta_{nm}^C$  ve  $\vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmoniklerine, Guassian yumuşatması uygulanarak  $W_{nm}^C$  ve  $W_{nm}^S$  elde edilir.
- Son olarak  $W_{nm}^C$  ve  $W_{nm}^S$  bölgesel küresel harmonik katsayıları ile  $\Delta C_{nm}^{strp}$ ,  $\Delta S_{nm}^{strp}$  GRACE küresel harmonik katsayıları, eşitlik (2.26)'da kullanılarak bölgesel su depolarındaki değişim (TWS) elde edilir [13].

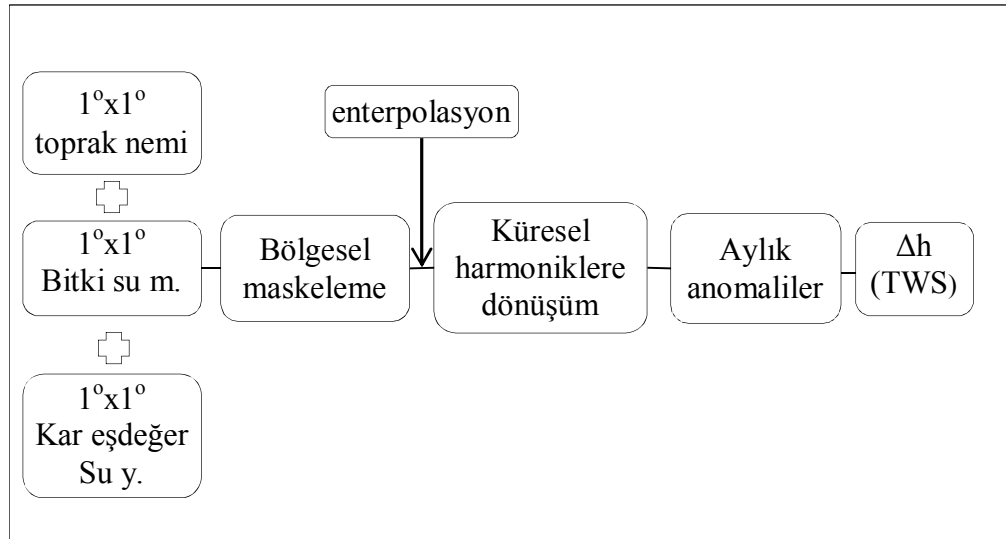


Şekil 4.2: GRACE veri işleme adımları-2.

Şekil 4.2'de, kfilter-DDK veri işleme adımları gösterilmektedir. Burada UT-CSR verileri işleme adımlarından farklı olarak, ortalama gravite modelinin Eigen-6c olması ile ortalama gravite alanı tüm ayların ortalaması olarak hesaplanmaz, bu verilere Kusche (2007) tarafından, hataların giderilmesi üzerine yaptığı ileri analiz işlemlerinden dolayı herhangi bir filtreleme işlemi uygulanmaz.

GLDAS karasal veri asimilasyon sisteminin, Giavonni çevrimiçi görselleştirme ve analiz aracı üzerinden Noah kara hidroloji model (toprak nemi, bitki su muhtevası vb.) yüzey verileri ile bölgesel su depolarındaki (TWS) değişimlerinin tespiti Şekil 4.3'te gösterildiği üzere;

- GLDAS/Noah karasal yüzey modelinden her bir  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  grid için verilen toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer su kalınlığı vb. değerler toplanarak, her bir grid için toplam su muhtevası elde edilir.
- Bölgeyi ilgilendiren her bir  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  gridin, toplam su muhtevası için ilgili bölge tüm dünya üzerinden maskelenir.
- Bölge içerisinde  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  gridlerdeki ölçülemeyen su değerleri, kendisine komşu gridlerden enterpole edilerek bulunur.
- $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  bölgesel küresel harmonikleri, eşitlik (2.27) ile istenilen açınım derecesinde hesaplanır.
- Aylık anomaliler ise küresel harmonik katsayılarının uzun dönemli ortalamalarının, her bir aya ait küresel harmonik katsayılarından çıkarılması ile elde edilir.
- Son olarak  $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  küresel harmonikleri eşitlik (2.14) kullanılarak bölgesel su depolarındaki değişim (TWS) elde edilir.



Şekil 4.3: GLDAS veri işleme adımları.

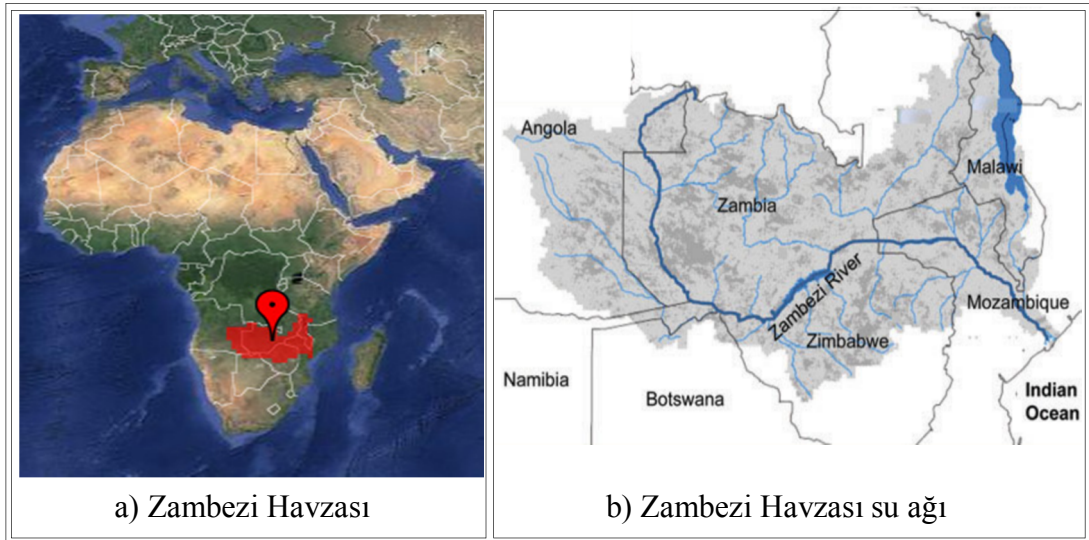


## 5.UYGULAMA

### 5.1. Test Alanı Zambezi Havzası

Afrika'nın güneyinde 8°-20° güney enlemleri ve 16.5°-36° doğu boylamları arasında yer alan Zambezi Havzası yaklaşık  $1.3 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>'lik bir alana sahiptir. Zambezi havzası gerek yüzey gerek yeraltı suları açısından Afrika'nın en geniş su ağını oluşturmaktadır. Ekvatorial iklim ve çöl iklimi arasında subtropical bir iklim yapısına sahip bölgede yıllık yağış miktarı 1000-2000 mm arasında en fazla Aralık-Nisan aylarında düşerken, bölge Eylül-Kasım aylarında yılın en sıcak aylarını yaşar. Sezonsal yağışlar sebebiyle tarımsal geçim kaynakları kısıtlıdır. Zambezi havzasının yaklaşık %75'ini orman ve çalılıklar oluşturmaktadır [49].

Zambezi Havzasının, GRACE bölgesel su tespiti uygulamalarında pek çok kez çalışılmış olması, GRACE'in 200.000 km<sup>2</sup>'den büyük alanlarda daha iyi sonuç vermesi sebebiyle yüzölçümü, coğrafi özellikleri, sezonsal sıcaklık ve iklim değişimleri, yeraltı ve yerüstü su potansiyeli, enlem etkileri ve de hem global kara yüzeyi belirleme uydularından hem de yersel ölçme teknikleriyle modellenmiş eşdeğer su yüksekliklerinin bulunması sebebiyle test alanı olarak belirlenmiştir.



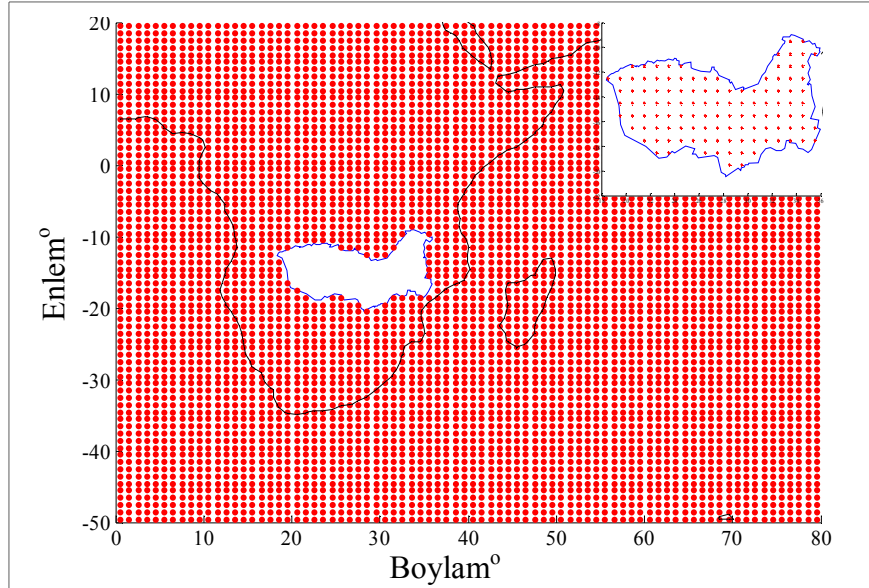
Şekil 5.1: Zambezi Havzası ve Zambezi Havzası su ağı.

Havza ya adını veren Zambezi Nehri Afrika'nın dördüncü büyük nehri olup, içme suyu, balıkçılık, sulama, hidroelektrik üretim, madencilik ve sanayide kullanımının

yanı sıra, havza yaklaşık 40 milyon kişiye ev sahipliği yapmaktadır.

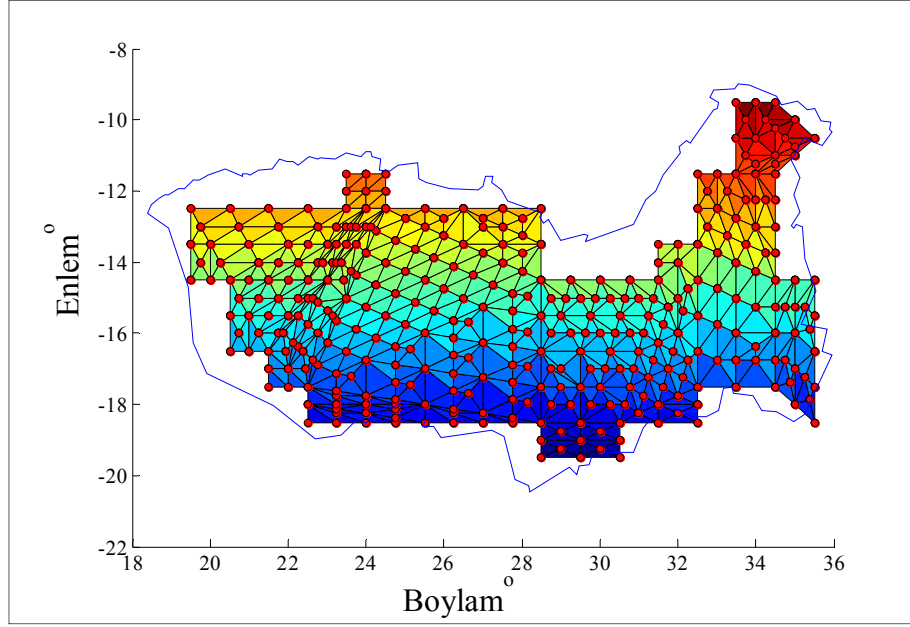
### 5.1.1. Zambezi Havzası'nın Bölgesel Fonksiyonu

Tez çalışmasının analiz işlemleri Matlab 2013a verisiyonunda programlanmış olup, UT-CSR ve ICGEM kfilter-DDK2 verileri üzerinden, bölgesel stokes katsayılarının belirlenmesi ve bölgesel su depolarındaki değişimin hesaplanması olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, Zambezi Havzası'na ait küresel harmonik katsayılarını belirlenmek üzere;  $1^\circ \times 1^\circ$ 'lik gridlere ayrılan tüm dünyadan Zambezi Havzası maskelenerek, grid koordinatları elde edilmiştir.



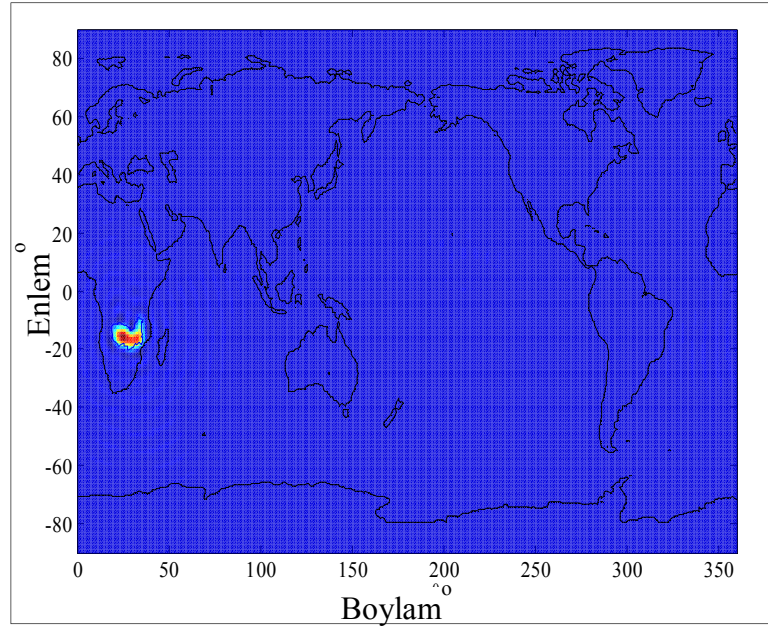
Şekil 5.2: Zambezi Havzasının maskelenmesi ve oluşturulan grid ağı.

Zambezi Havzasını tanımlayan küresel harmonik katsayıları eşitlik (2.23)'teki integral hesabı ile açılım derecesi 60 olmak üzere,  $\vartheta_{nm}^C, \vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmonik katsayıları elde edilmiştir. Şekil 5.3'te nümerik integral işlemine ait üçgenleme gösterilmektedir.



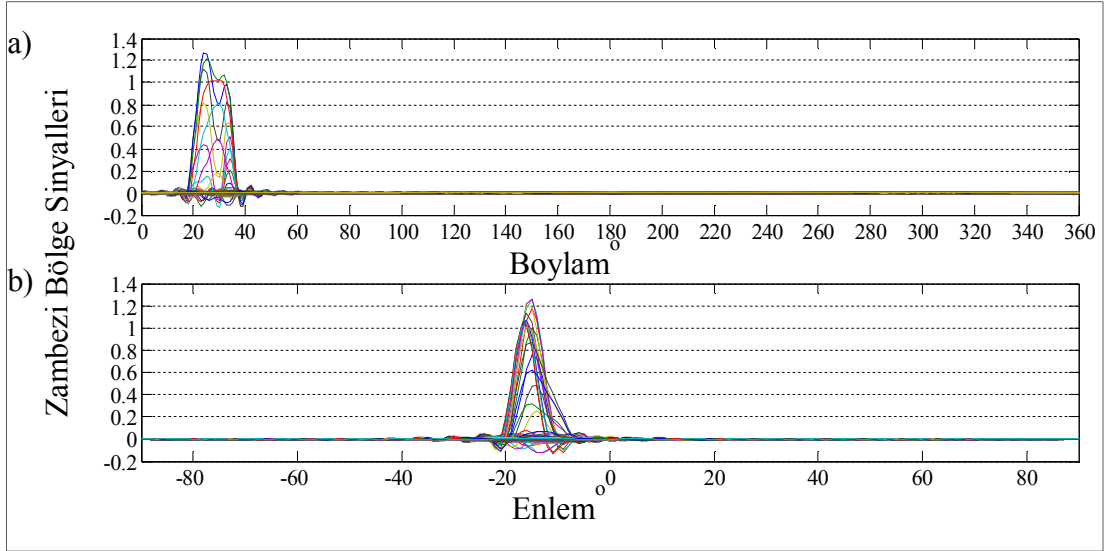
Şekil 5.3: Zambezi Havzasının nümerik integrasyonu için kullanılan üçgenleme.

Zambezi Havzasına ait kernel (exact averanging) hesabına ilişkin küresel harmonik katsayıları kullanılarak eşitlik (2.25) ile tüm dünya üzerinden hesaplandığında, sonuç Şekil 5.4'te görülmektedir.



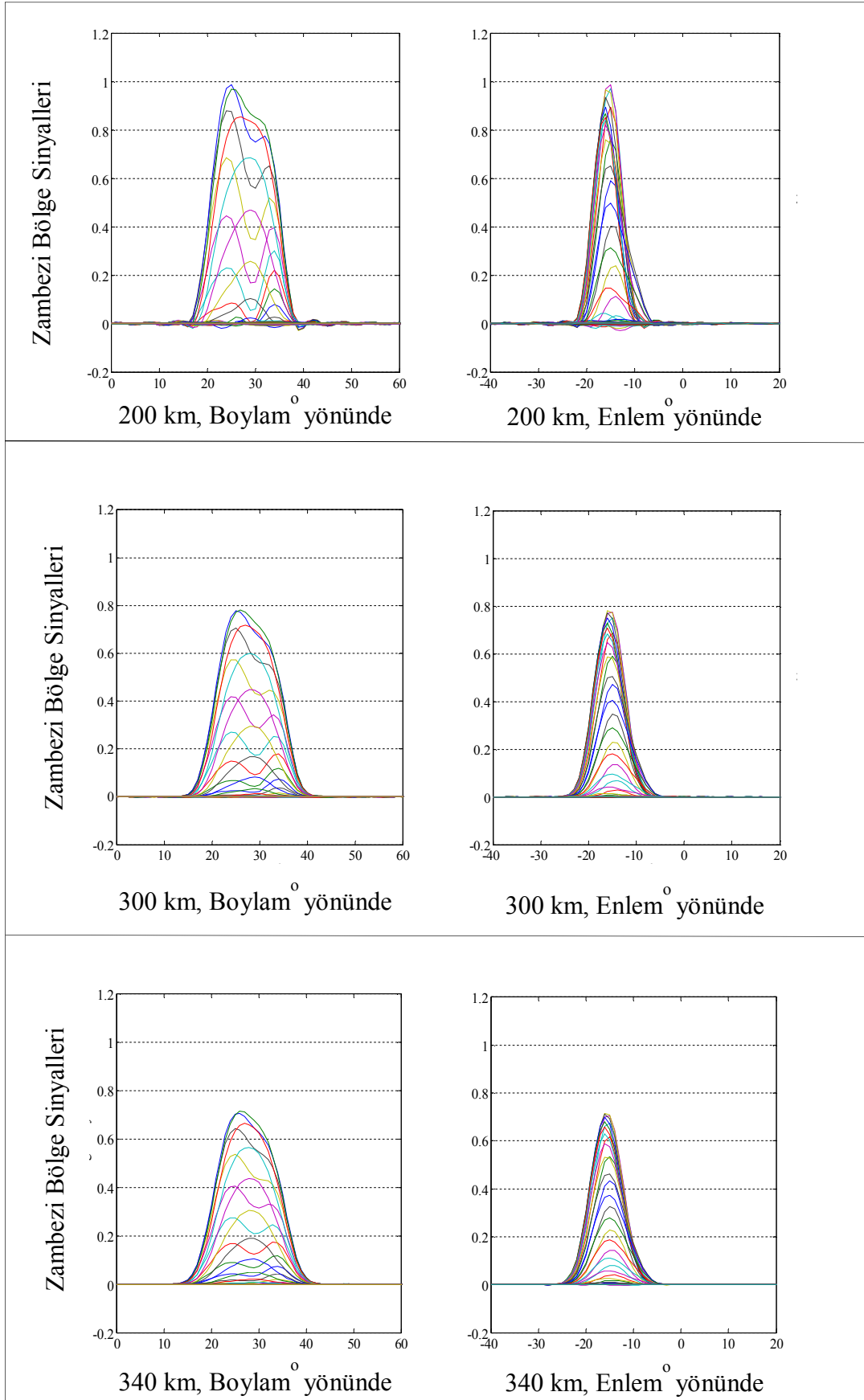
Şekil 5.4: Zambezi Havzası'nın kernel yaklaşımını esas alan küresel harmoniklerle dünya üzerinde gösterimi.

Şekil 5.4’de Zambezi Havzası çevresinde, tüm dünyaya açılan dalgalar görülmektedir. Şekil 5.5’te, Zambezi Havza Sinyallerinin, bölge içerisinde 1 dışarısında 0 olması beklenirken; özellikle 0’ın altında kalan değerler, Şekil 5.4’deki enlemsel ve boylamsal dalgalanmalara sebep olarak bölge sinyallerinin dışarıya taşmasına neden olmuştur.

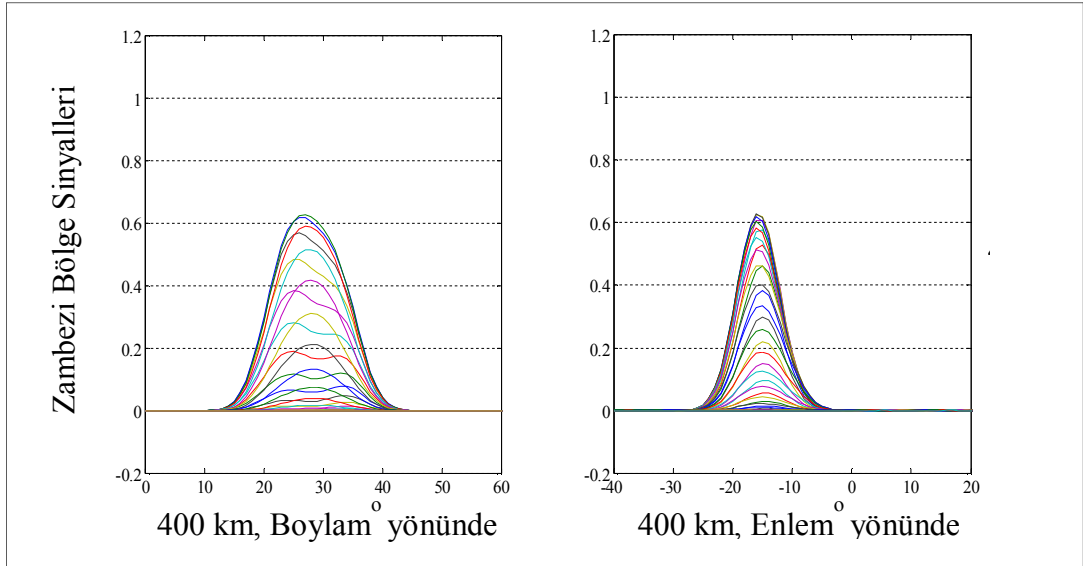


Şekil 5.5: Zambezi'nin kernel yaklaşımını esas alan bölgesel sinyalleri  
a) Boylam yönünde, b) Enlem yönünde.

Şekil 5.6’da, 200 km, 300 km, 340 km , 400 km yumuşatma yarıçapları kullanılarak, enlem ve boylam yönündeki sonuçları, Şekil 5.7 değerlendirilmiş, Zambezi Havzası için en uygun yumuşatma yarıçapı belirlenmiştir. Analiz içerisinde kullanılan yumuşatma yarıçapları, tez çalışmasında ICGEM kfilter-DDK2 verilerinde kullanılmış olan 340 km yumuşatma yarıçapı ile uyumlu olması açısından deneme aralıklarına alınmıştır.

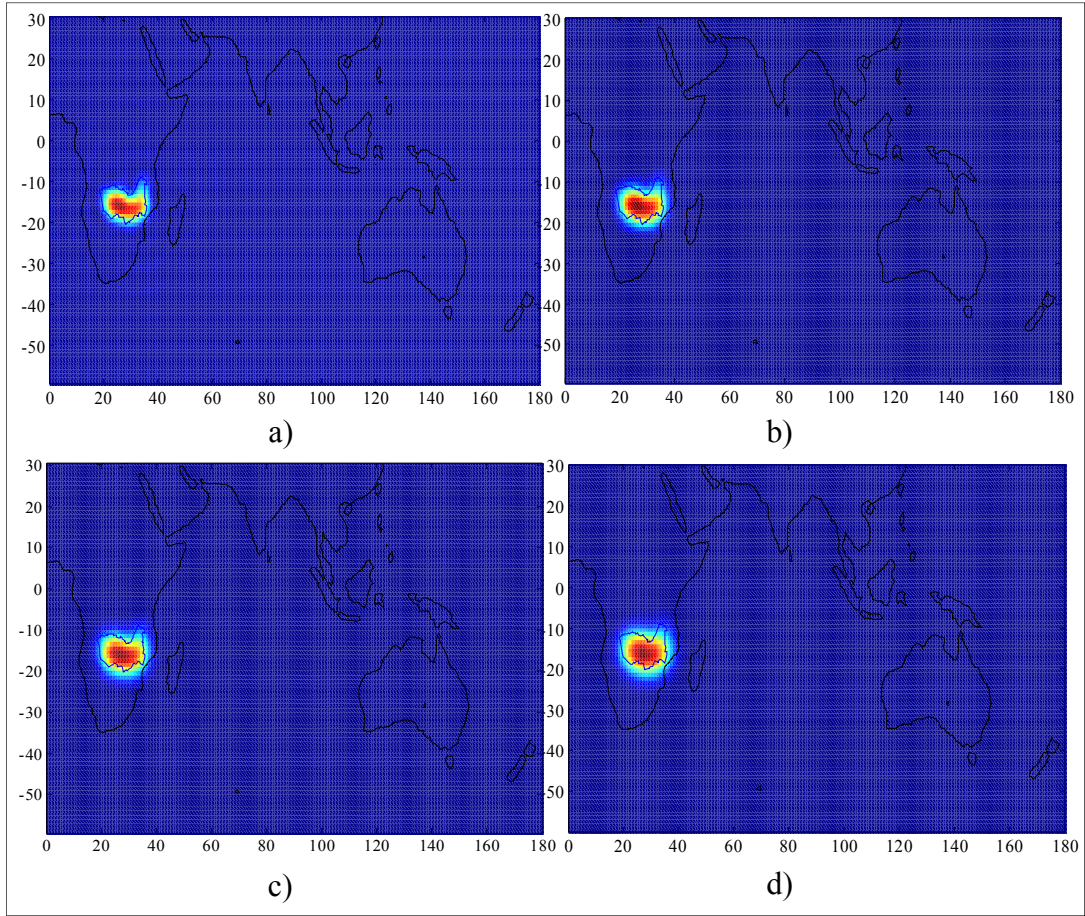


Şekil 5.6: Farklı yumuşatma yarıçapları uygulanan Zambezi Havzası bölge sinyalleri.



Şekil 5.6: Devam.

Şekil 5.6'da, 200 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Zambezi Havza sinyalleri, bölge içerisinde optimal gözükse de Şekil 5.7'de, Havzanın küresel harmoniklerle dünya üzerindeki gösteriminde (a), enlem ve boylam yönünde dalgalanmalar gözükmetedir. Bu yüzden 200 km yarıçaplı Guassian yumuşatması Havzayı tanımlamada yetersiz kalmıştır. Şekil 5.6'da, 300 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Zambezi Havza sinyalleri, bölge içerisinde 1 değerinden uzaklaşsa da, Şekil 5.7'de, Havzanın küresel harmoniklerle dünya üzerindeki gösteriminde (b), dalgalanmalar giderilmiştir. Şekil 5.6'da, 340 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Zambezi Havza sinyalleri, bölge içerisinde 1 değerinden uzaklaşmış ve dalgalanmalar tamamen giderilmiş, Şekil 5.7'de, Havzanın küresel harmoniklerle dünya üzerindeki gösteriminde (c), bölgesel sinyaller, bölgenin dışarısına taşmıştır. Şekil 5.6'da, 400 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Zambezi Havza sinyalleri, bölge içerisinde 1 değerinden oldukça uzaklaşmış, Şekil 5.7'de, Havzanın küresel harmoniklerle dünya üzerindeki gösteriminde (d), bölgesel sinyaller, bölgenin dışarısına yayılmıştır.



Şekil 5.7: Farklı yumuşatma yarıçaplarına sahip kernel yöntemiyle hesaplanmış Zambezi bölgesel sinyallerinin küresel harmoniklerle gösterimi a) 200 km, b) 300 km, c) 340 km, d) 400 km.

Yumuşatma yarıçapı büyüdüğünde bölge sinyalleri kaybedilerek, çözümlere sinyal kaybı olarak aktarılmaktadır. Şekil 5.6, Şekil 5.7 değerlendirilmiş, Zambezi Havzası için en uygun yumuşatma yarıçapının, 340 km olduğuna kanaat getirilmiştir.

### 5.1.2. Grace ile Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişimin Hesabı

Şekil 4.1’de, akış diyagramı verilen, GRACE veri işleme yöntemi izlenerek; Zambezi Havzası su depolarındaki değişim (TWS) hesaplanmıştır. Şubat 2003 ve Şubat 2006 arasındaki 37 aylık, açınım derecesi 60 olan, küresel harmoniklerdeki düşük dereceli katsayılar ( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ ,  $C_{20}$ ), SLR’den elde edilen katsayılar ile yer değiştirilmiştir. Ortalama gravite modeli, 37 aylık küresel harmonik katsayılarının ortalaması şeklinde elde edilmiştir. 37 aylık küresel harmonik katsayılarından, ortalama gravite modeli çıkarılarak, aylık anomaliler hesaplanmıştır. Aylık

anomalilere 'P4M6' filtresi uygulanarak katsayılar iyileştirilmiştir. Havza için maskelenmiş küresel harmonik katsayıları ile filtrelenmiş ve gravite değişimlerini gösteren,  $\Delta C_{nm}^{strp}$ ,  $\Delta S_{nm}^{strp}$ , GRACE küresel harmonik katsayıları eşitlik (2.26) kullanılarak Zambezi Havzası'nın su depolarındaki değişim (TWS) elde edilmiştir.

### 5.1.3. GLDAS/Noah ile Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişimin Hesabı

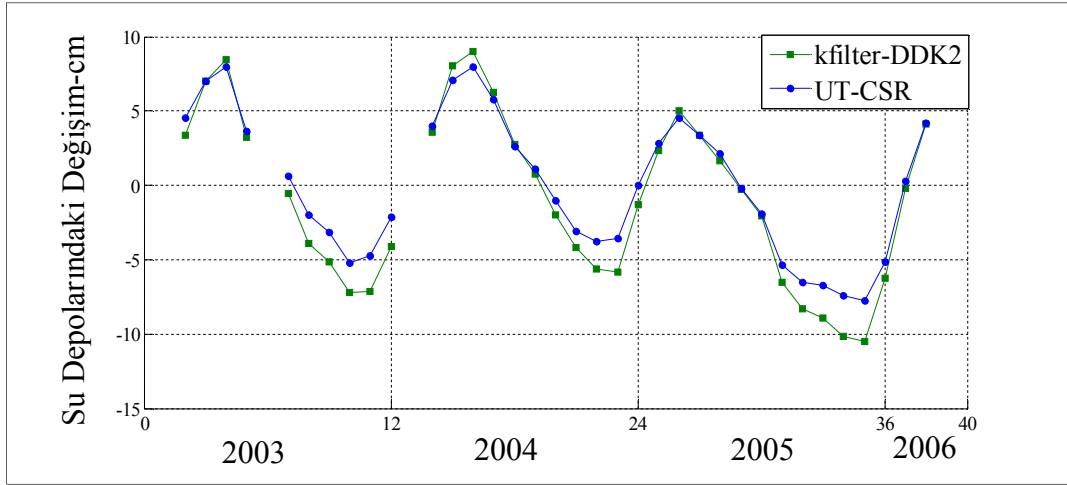
GLDAS/Noah verileri için, Şekil 4.2'de gösterilen veri işleme yöntemi izlenerek, Havza gridlerindeki su yüksekliklerinden küresel harmonik katsayılarının belirlenmesi ve bölgesel su depolarındaki değişimin hesaplanması olmak üzere iki değerlendirme adımı gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Havza gridlerindeki su yüksekliklerinin, stokes katsayıları şeklinde belirlenmesi için GLDAS Giavonni interaktif arayüzü kullanılarak, Noah kara yüzey modelinden Zambezi Havzası'nın iklim özellikleri göz önüne alındığında,  $1^\circ \times 1^\circ$  lik gridler üzerindeki toprak nemi (1, 2, 3, 4), bitki su muhtevası alınarak her bir griddeki su değişkenleri toplanmış ve Havza tüm dünyadan maskelenmiştir.  $1^\circ \times 1^\circ$  lik gridlerdeki toplam su muhtevası ölçülemeyen değerleri, komşu noktalardan enterpole edilmiş, verisi olmayan birkaç nokta hesaplanarak bölge içerisindeki her bir gridin su toplamı hesaplanmıştır.  $1^\circ \times 1^\circ$  çözünürlüklü gridlerdeki toplam su muhtevasının küresel harmonik katsayılarına dönüşümü, eşitlik (2.27) ile hesaplanmış ve  $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  küresel harmonik katsayılarına ulaşılmıştır. Son olarak,  $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  küresel harmonikleri eşitlik (2.14) kullanılarak bölgesel su depolarındaki değişim (TWS) elde edilmiştir. GLDAS/Noah verileri üzerinde herhangi bir ileri analiz (yumuşatma, filtreleme vb.) yapılmamış olup, her bir griddeki su toplamalarının bölgesel harmoniklerle ifade edildiği, Zambezi Havzası su depolarındaki değişimi vermektedir.

### 5.1.4. Zambezi Havzası Su Depolarındaki Değişim

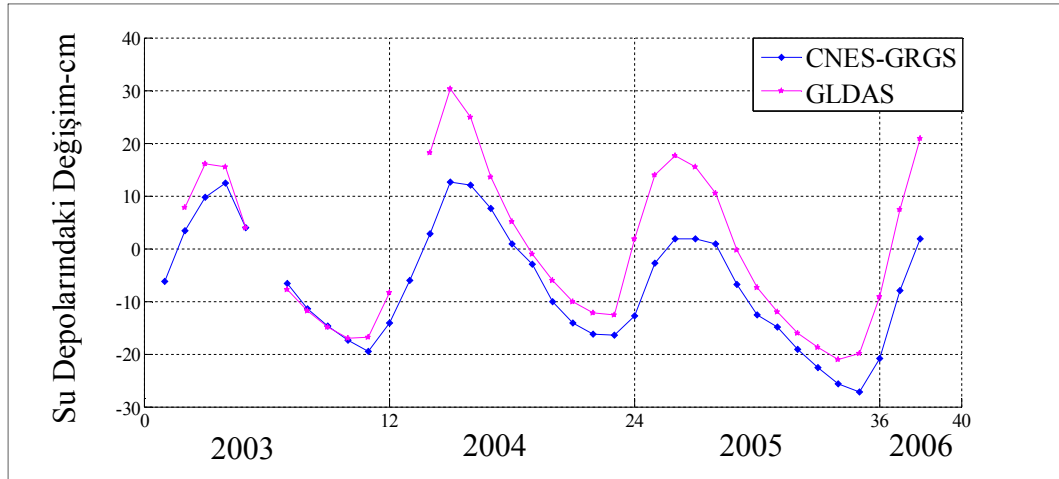
UT-CSR, kfilter-DDK2 ile elde edilen Zambezi Havzası'nın su depolarındaki değişim (TWS) değerleri Şekil 5.8'de gösterilmektedir.





Şekil 5.8: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 1.

GLDAS ile hesaplanan ve CNES/GRGS interaktif arayüzden alınan Zambezi Havzası'nın su depolarındaki değişim (TWS) değerleri Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 2.

### 5.1.5. Zambezi Su Depolarındaki Değişimin Değerlendirilmesi

Şekil 5.8'de UT-CSR küresel harmonik katsayılarına uyguladığımız veri işleme adımları ile ICGEM tarafından yine UT-CSR küresel harmonik katsayılarına 'DDK2' filtresi kullanılarak elde edilen, su depolarındaki değişim, arasındaki maksimum fark ~2 cm'dir. Şekil 5.9'da CNES/GRGS interaktif arayüzden sağlanan ve GLDAS ile elde edilen su depolarındaki değişim kıyaslanmıştır. GRACE ile GLDAS verilerinden elde edilen su depolarındaki değişimin karşılaştırılması

GLDAS'ın GRACE ile aynı veri işleme adımlarından geçmesiyle sağlanabilmektedir [3], [5], [15]. Ancak Şekil 4.2'de GLDAS verilerinden, bölgesel küresel harmonik katsayılarına dönüştürülerek elde edilen su depolarındaki değişimlere, GRACE verilerine uygulanan ileri analiz işlemleri uygulanmayıp, ham su verisi ile kıyaslanarak GLDAS ile GRACE'den elde edilen sonuçlar arasındaki fark gözlemlenmiştir. Şekil 5.9 GLDAS ile CNES/GRGS sonuçlarının birbiriyle paralel olduğu, ancak CNES/GRGS verilerinin ölçeklenerek bölgesel su depolarındaki değişimin yakalanabileceği görülmektedir.



Şekil 5.10: Zambezi Havzası su depolarındaki değişim 3.

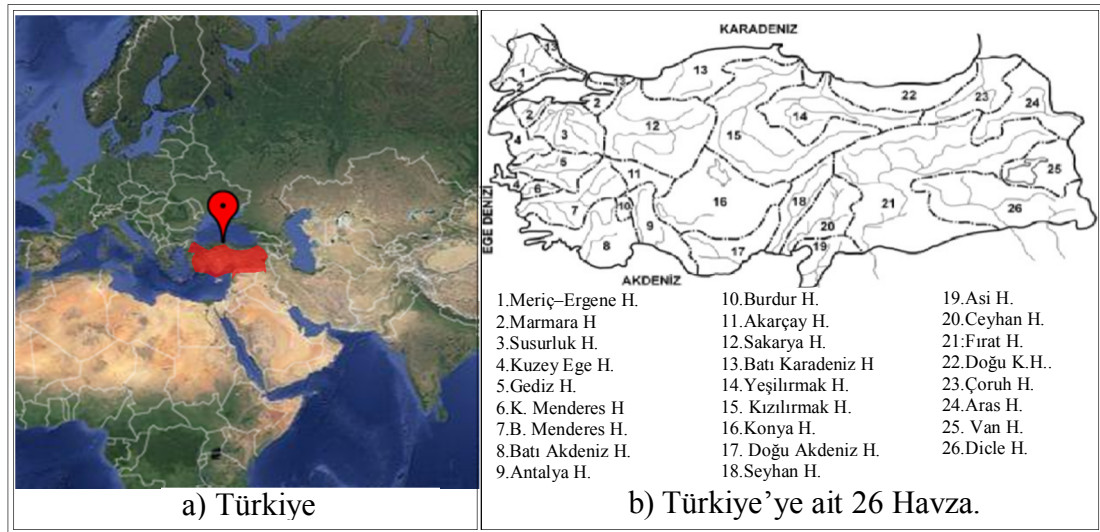
Klees ve arkadaşlarının 2008 yılındaki çalışmasında, GRACE uydu misyonu ile elde edilmiş, açınım derecesi 120 olan çözümlerin, Eigen-GL04C referans gravite alanından sapmasını temsil eden DEOS küresel harmonik katsayılarına farklı filtre yaklaşımları deneyip, uygun filtre boyutlarını, Zambezi Nehir Havzası ve Sahara Çölü için belirlemişlerdir. Çalışmada kullanılan filtrelerden bir tanesi korelasyon giderici ve 400 km yumuşatma yarıçapına sahip, DS400 filtresi uygulanan Zambezi Havzasının su depolarındaki değişiminin yaklaşık sonuçları alınarak, tez çalışmamızda UT-CSR verilerine de uyguladığımız korelasyon giderici ve 400 km yumuşatma yarıçapına sahip filtre kombinasyonu ile elde ettiğimiz, Zambezi Havzası su depolarındaki değişim değerleri ile kıyaslanmıştır.

Klees ve arkadaşları, çalışmada Zambezi Havzası için uygun filtreyi ANS (anisotropic, non-symmetric filter) olarak belirlese de, tez çalışması kapsamında analiz işlemlerimizi kıyaslamak adına DS400 filtre boyutlarına yakın filtreleme, UT-

CSR verileri için uygulandı ve DS400 ve UT-CSR400 arasında maksimum ~3 cm olduğu görülmüştür. Bu farkın, DEOS verilerinin açınım derecesinden, veri işleme yöntemlerinden, ortalama gravite alanından kaynaklandığı söylenebilir. Bununla beraber Şekil 5.8’de UT-CSR ve kfilter-DDK2 arasındaki farkın ~2 cm olması, uyguladığımız veri işleme hesaplamalarının birbirine yakın olduğunu gösterir. Farklı veri merkezleri üzerinden Zambezi Havzası için yapılan değerlendirmelerde, sonuçların yapılan önceki çalışmalarla da [9], [14], [16], [17] paralel olduğu görülmüştür.

## 5.2. Türkiye Örneği

Türkiye kuzey yarımküre’de, 36°-42° kuzey enlemleriyle, 26°-45° doğu boylamları arasında yer alır. Yaklaşık 783.562 km<sup>2</sup>’lik bir alana sahiptir. Ortalama yükseltisi 1130 m olan ülkemiz [50], yüzey suları ve yeraltı suları açısından geniş su ağına sahip, hidrolojik niteliği açısından Şekil 5.11’de gösterilen, 26 havzaya ayrılmıştır [51]. Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle farklı iklim tiplerinin görüldüğü bir ülkedir.



Şekil 5.11: Türkiye ve Türkiye’ye ait 26 Havza.

Çevresindeki denizlere, kara kütlelerine, basınç merkezlerine ve enleme bağlı oluşan üç ana iklim tipi belirlemiştir. Türkiye’de her mevsim yağış alabilen, maksimum yağışı sonbahar mevsimine rastlayan, yıllık ortalama sıcaklığı 13-15°C

olan Karadeniz iklimi, yazları sıcak ve kurak, kışlar ılık, yağışlı geçen, maksimum yağışı kış mevsimine, minimum yağışı yaz mevsimine rastlayan, yıllık sıcaklık ortalaması 18-20°C olan Akdeniz iklimi, yazlar sıcak ve kurak, kışlar soğuk ve kar yağışlı geçen, maksimum yağışı ilkbahar, minimum yağışı yaz mevsimine rastlayan, yıllık ve günlük sıcaklık farkları en fazla olan, Karasal iklim tipleri görülmektedir [52]. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 643 mm'dir, farklı iklim tiplerine bağlı olarak, Akdeniz iklimi görülen yerlerde maki ve ormanlar, Karadeniz iklimi görülen yerlerde ormanlar ve Karasal iklim görülen yerlerde bozkırlara rastlanır. Ülkemizin yaklaşık %26.6'sını ise ormanlık alanlar oluşturmaktadır.

### 5.2.1. Türkiye'nin Su Potansiyeli

Dünyadaki toplam su miktarı 1.4 milyar km<sup>3</sup>'tür. Bu suların %97.5'i okyanuslarda ve denizlerde tuzlu su olarak, %2.5'i ise nehir ve göllerde tatlı su olarak bulunmaktadır [53], [54]. Nüfus artışı, hızlı şehirleşme ve sanayileşmenin yol açtığı su ihtiyacı ve iklim değişikliği, kullanılabilir su miktarının azalmasına sebep olmakla birlikte, su, 21. yüzyılın en önemli stratejik kaynaklarından biridir.

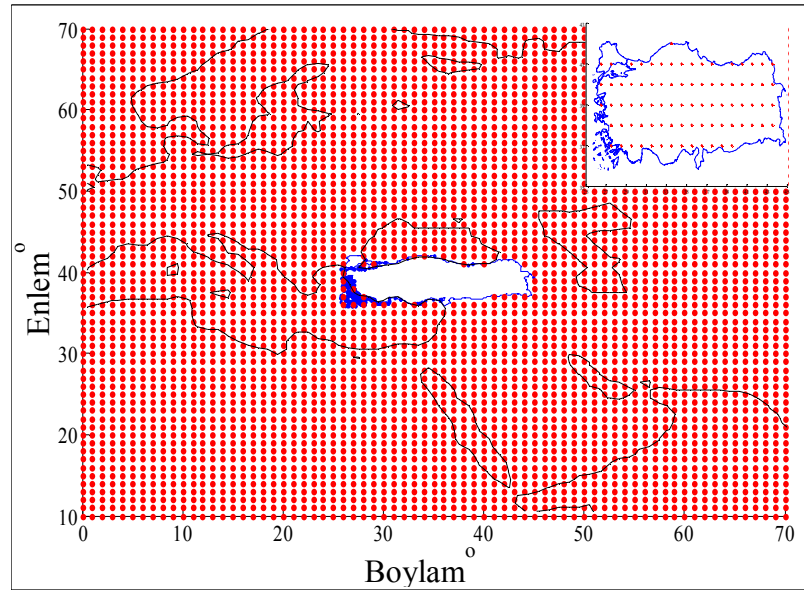
Türkiye'de yıllık ortalama yağış yaklaşık 643 mm olup, yılda ortalama 501 milyar m<sup>3</sup> suya karşılık gelmektedir. Bu suyun 274 milyar m<sup>3</sup>'ü toprak ve su yüzeyleri ile bitkilerden olan buharlaşmalar yoluyla atmosfere geri dönmekte, 69 milyar m<sup>3</sup>'lük kısmı yeraltı suyunu beslemekte, 158 milyar m<sup>3</sup>'lük kısmı ise akışa geçerek çeşitli büyüklükteki akarsular vasıtasıyla denizlere ve kapalı havzalardaki göllere boşalmaktadır. Yeraltı suyunu besleyen 69 milyar m<sup>3</sup>'lük suyun, 28 milyar m<sup>3</sup>'ü pınarlar vasıtasıyla yerüstü suyuna tekrar katılmaktadır. Ayrıca komşu ülkelerden ülkemize gelen yılda ortalama 7 milyar m<sup>3</sup> su bulunmaktadır. Böylece ülkemizin brüt yerüstü suyu potansiyeli 193 milyar m<sup>3</sup> olmaktadır. Yeraltına ulaşarak yeraltı suyuna katılan 41 milyar m<sup>3</sup>'lük su miktarı da eklendiğinde, ülkemizin yenilenebilir brüt su potansiyeli 234 milyar m<sup>3</sup>'e ulaşır [55].

Türkiye'de kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 1.519 m<sup>3</sup> civarında olup, su zengini bir ülke değildir [56]. Bu sebeple Türkiye'de alternatifi olmayan doğal bir kaynak olan suyun potansiyeli gerektiği biçimde izlenmeli, planlı ve ekonomik kullanım politikaları oluşturulmalı, su kaynaklarını tehdit eden sorunlar belirlenerek, akıllı su yönetim politikaları geliştirilmelidir.

Tez çalışmasında Ocak 2004 ve Haziran 2014 arasındaki 126 aylık GRACE (UT-CSR, kfilter-DDK, CNES/GRGS) ve GLDAS/Noah verisi kullanılarak Türkiye'nin uzun dönemli su potansiyeli değerlendirilmiştir. Türkiye'nin su depolarındaki değişimlerine sebep olan çevresel etmenler yorumlanmıştır.

### 5.2.2. Türkiye'nin Bölgesel Fonksiyonu

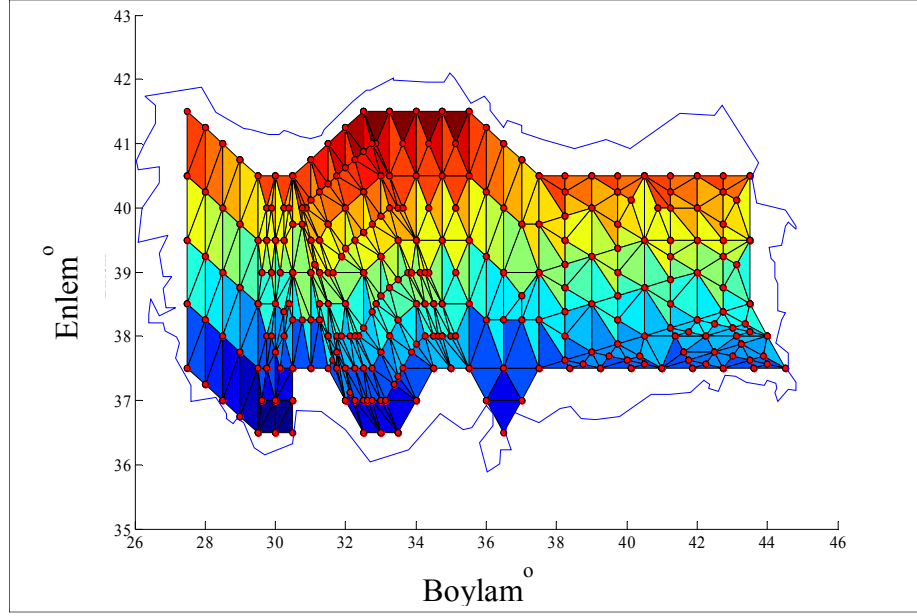
Test alanı Zambezi Havzası üzerinde denenen değerlendirme yöntemi ve yaklaşım, Türkiye su depolarındaki değişimin tespiti için kullanılmıştır. Değerlendirme UT-CSR ve ICGEM kfilter-DDK3 verileri üzerinden, bölgesel stokes katsayılarının belirlenmesi ve bölgesel su depolarındaki değişimin hesaplanması olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, Türkiye'ye ait küresel harmonik katsayılarını belirlenmek üzere;  $1^\circ \times 1^\circ$  gridlere ayrılan tüm dünyadan Türkiye maskelenerek, grid koordinatları elde edilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12: Türkiye'nin maskelenmesi ve oluşturulan grid ağı.

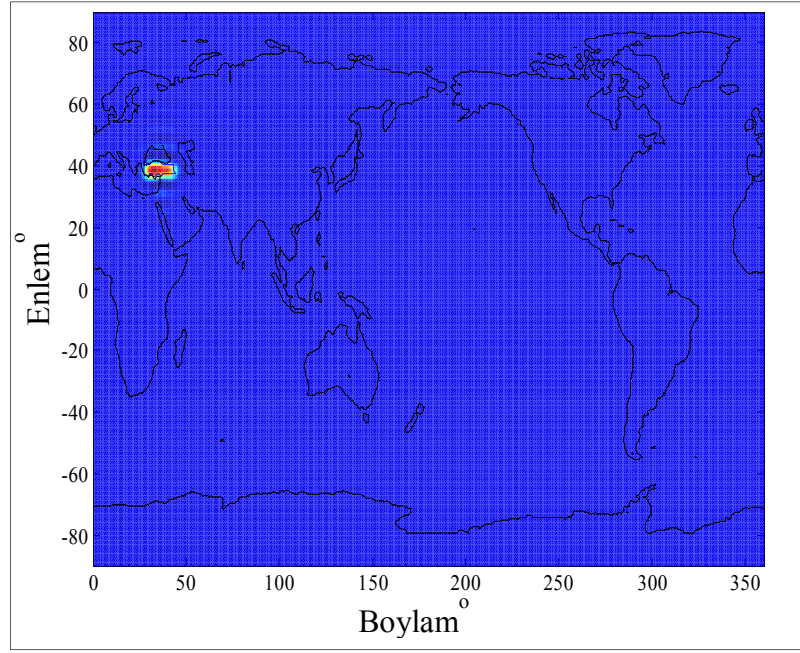
Türkiye'yi tanımlayan küresel harmonik katsayıları eşitlik (2.23)'deki integral hesabı ile açılım derecesi 60 olmak üzere,  $\vartheta_{nm}^C, \vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmonik katsayıları elde edilir. Şekil 5.13'te nümerik integral işlemine ait üçgenleme gösterilmektedir. Bu işlem, Swenson ve Wahr (2002)'in çalışmasında nehir havzaları, okyanus tabanı ya da buzul tabaka bölgelerini şekil itibarıyla tanımlayan kesin ortalamalı kernel

(exact averanging kernel) metodu olarak adlandırdıkları çalışma bölgesini tanımlayan bir yöntemdir.



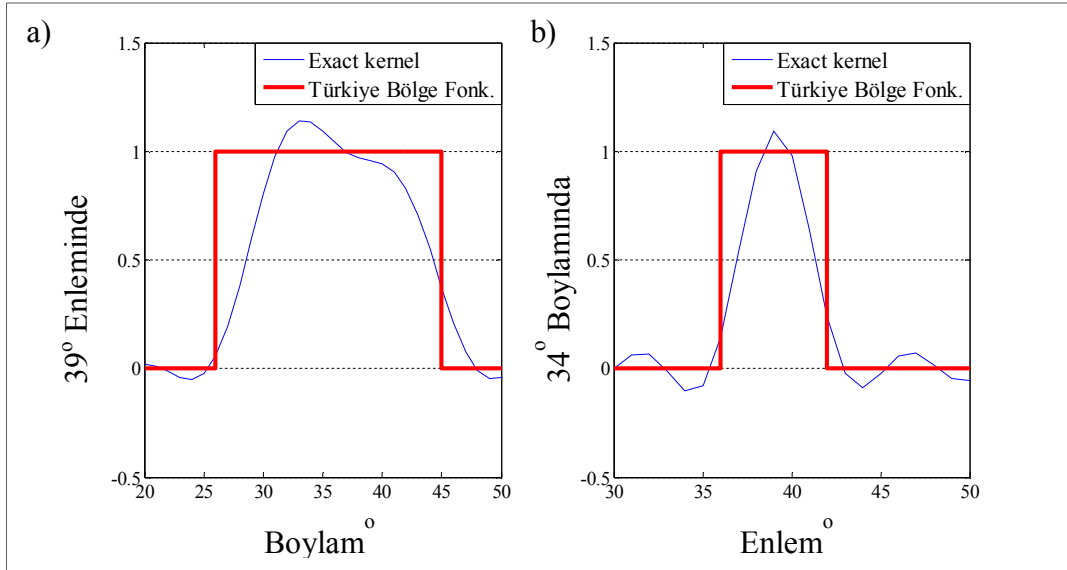
Şekil 5.13 Türkiye'nin nümerik integrasyonu için kullanılan üçgenleme.

Türkiye'ye ait kernel (exact averanging) hesabına ilişkin küresel harmonik katsayıları kullanılarak eşitlik (2.25) ile tüm dünya üzerinden hesaplandığında, sonuç Şekil 5.14'de görülmektedir.



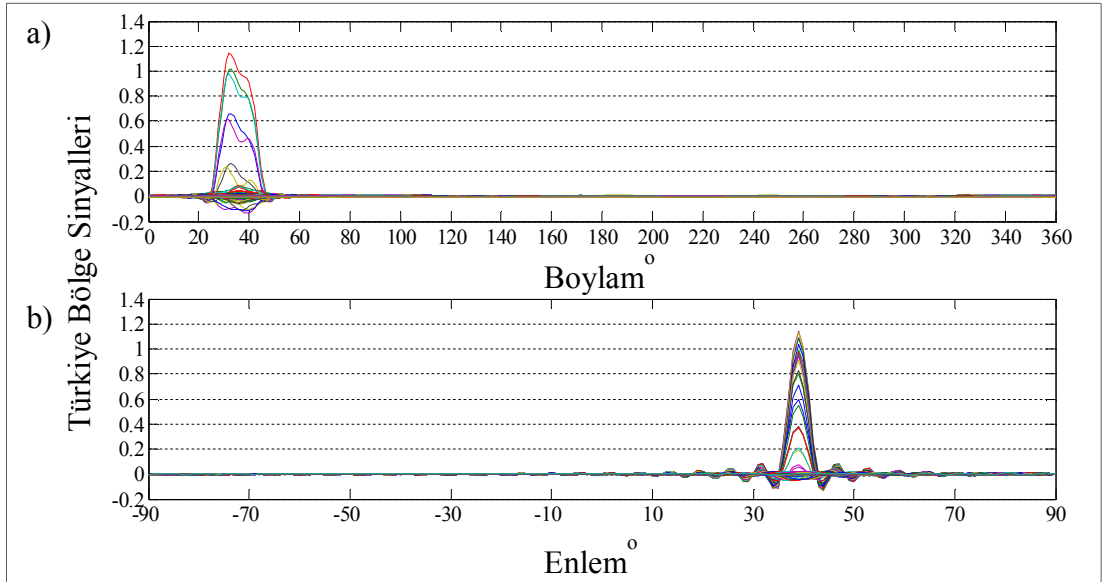
Şekil 5.14: Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan küresel harmoniklerle dünya üzerinde gösterimi.

Şekil 5.15 exact kernel yaklaşımı ile hesaplanan, Türkiye'ye ait  $39^\circ$  enlemi ve  $34^\circ$  boylamındaki sinyallerin,  $26^\circ$ - $45^\circ$  boylamları ve  $36^\circ$ - $42^\circ$  enlemlerinden geçiş kesitini göstermektedir.



Şekil 5.15: Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan a)  $39^\circ$  enlemine, b)  $34^\circ$  boylamına ait sinyallerin bölge içerisinden geçiş kesiti.

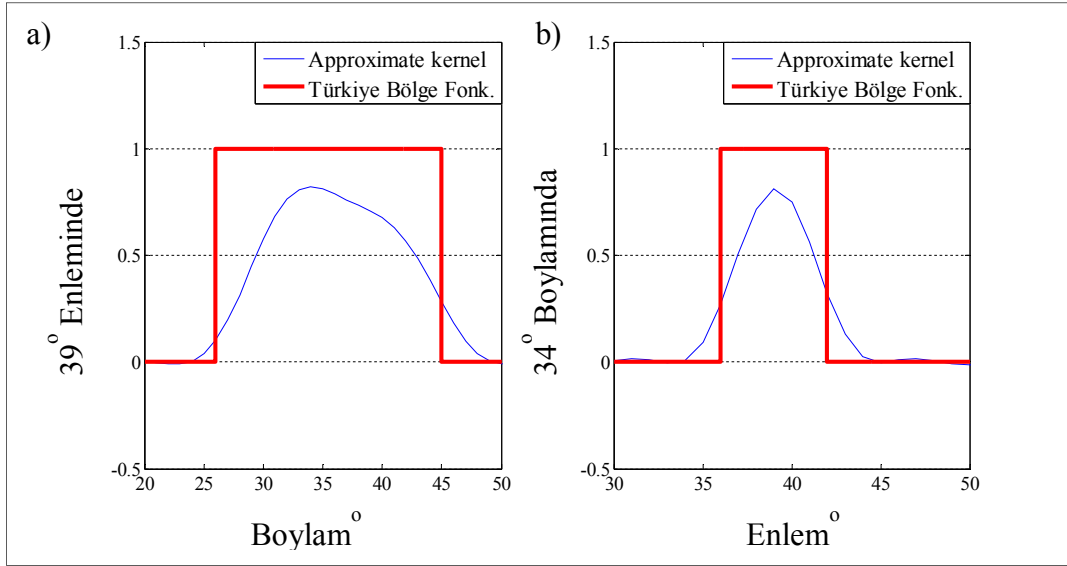
Eşitlik (2.23),  $\vartheta(\theta, \phi)$  bölgeyi temsil eden fonksiyon olup, bölge içerisinde 1, bölge dışında ise 0 değeri alınarak hesaplanan nümerik integrasyon işlemi sonucunda  $\vartheta_{nm}^C$  ve  $\vartheta_{nm}^S$  bölge küresel harmonikleri elde edilir. Ancak bölge sınırı tam olarak 1-0 değerini alabilecek sürekliliğe sahip olmamakla beraber eşitlik (2.23)'teki, Türkiye küresel harmoniklerinin açınım derecesinin 60 ile sınırlandırılması bölge sınırının tam olarak belirlenememesine, aynı zamanda ölçme hataları ile yüklü kısa dalga boylu sinyallerin çözüme dahil edilmesine sebep olur [13], [14]. Şekil 5.14'de Türkiye sinyallerinin bölge içerisinde 1, dışarısında 0 olması beklenirken, 1-0 dışında kalan değerler Şekil 5.16'daki enlemsel ve boylamsal dalgalanmalara sebep olarak, bölge sinyallerinin sızıntı oluşturmalarına neden olmuştur.



Şekil 5.16: Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan bölgesel sinyalleri  
a) Boylam yönünde, b) Enlem yönünde.

Swenson ve Wahr'ın 2002 yılındaki çalışmasında, exact kernel yönteminin gerçek bölge sınırları tam olarak yansıtamadığını, çalışma bölgesi sınırları boyunca uygulanacak yumuşatma ile hem uydu ölçme hataları hem de sızıntı hatalarını minimize edilerek, kısa dalga boylu sinyallerin çözümlere etkilerinin azaltılacağını belirtmişlerdir. Şekil 5.17'de yaklaşık (approximate) kernel yaklaşımı ile hesaplanan Türkiye'ye ait  $39^\circ$  enlemi ve  $34^\circ$  boylamındaki, 200 km yarıçaplı yumuşatma filtresi uygulanan sinyallerin,  $26^\circ$ - $45^\circ$  boylamları ve  $36^\circ$ - $42^\circ$  enlemlerinden geçiş kesitini göstermektedir.

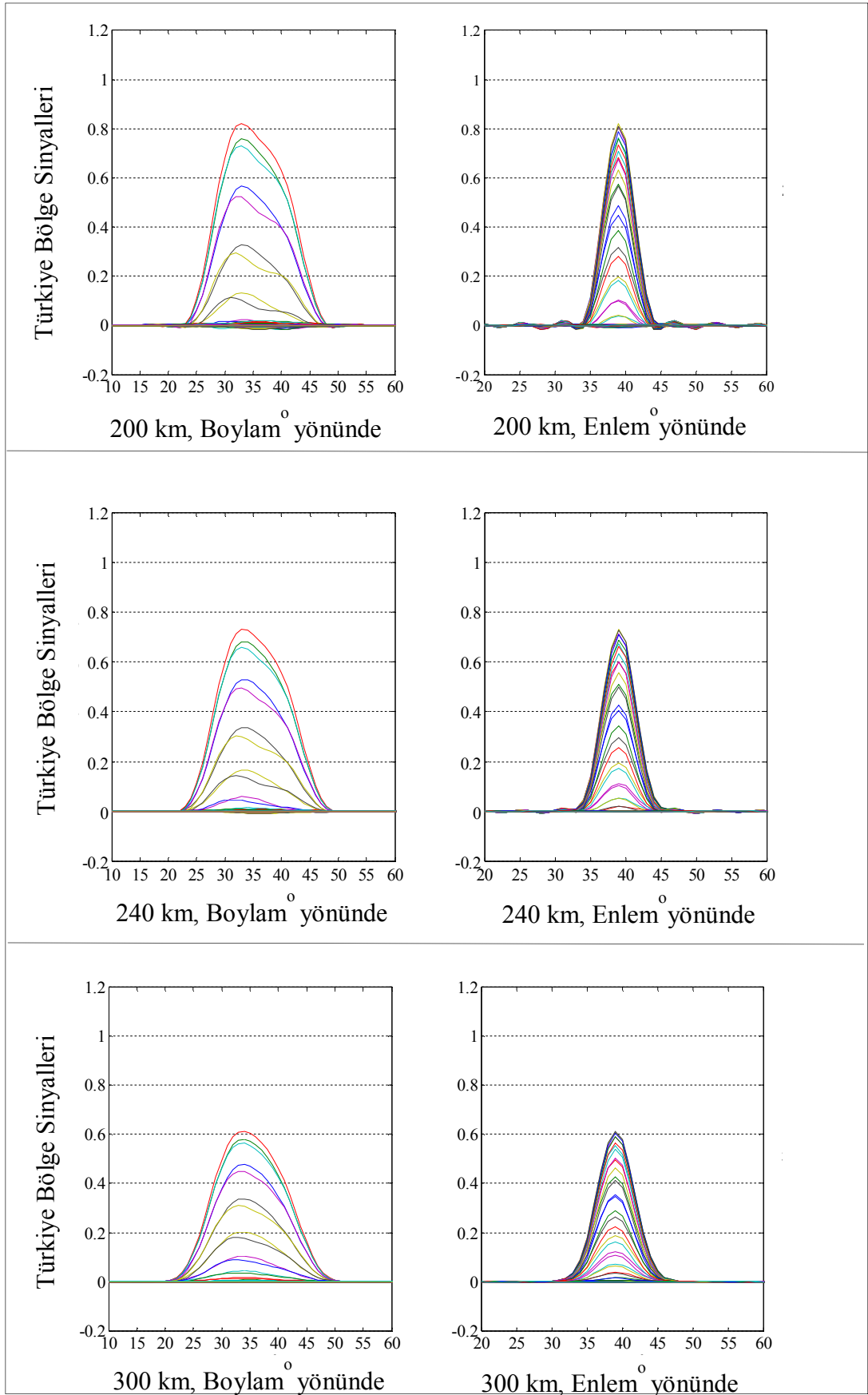




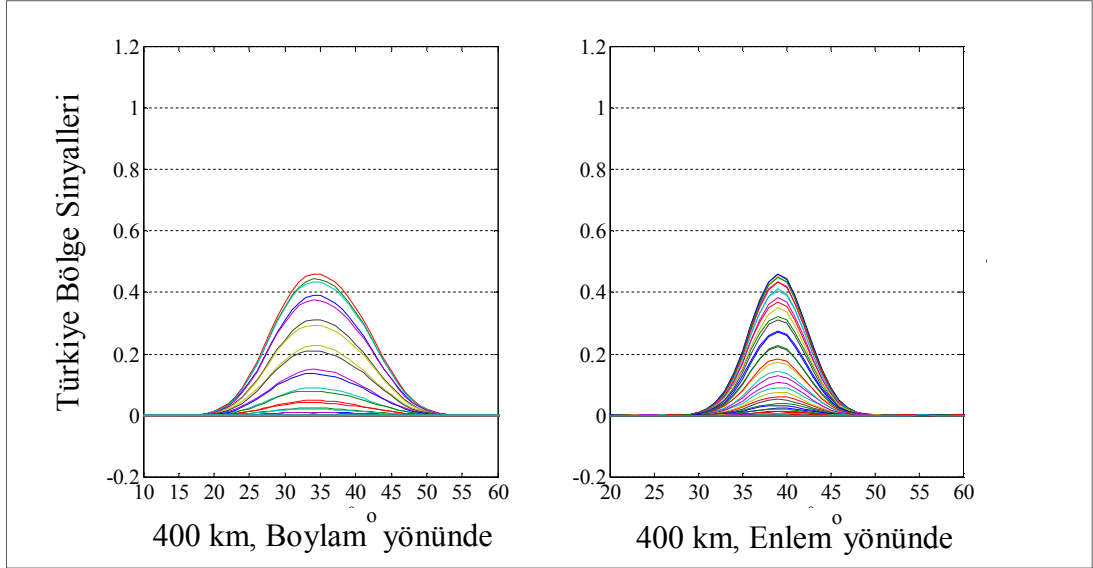
Şekil 5.17: Türkiye'nin kernel yaklaşımını esas alan a) 39° enlemine, b) 34° boylamına ait 200 km yarıçaplı yumuşatma filtresi ile filtrelenmiş sinyallerin bölge içerisinde geçiş kesiti.

Şekil 5.17'de, 200 km yumuşatma yarıçapı uygulanmış bölge sinyallerinin küçüldüğü görülmektedir. Hem bölge sinyallerini kaybetmeden hem de hataların sebep olduğu dalgalanmaları azatabilecek bir yumuşatma yarıçapının seçimi su depolarındaki değişimi doğru bir şekilde belirleyebilmek adına önemlidir.

Şekil 5.18'de, 200 km, 240 km, 300 km, 400 km yumuşatma yarıçapları kullanılarak, enlem ve boylam yönündeki sonuçları, Şekil 5.19 değerlendirildi, Türkiye için en uygun yumuşatma yarıçapı belirlenmiştir. Analiz içerisinde kullanılan yumuşatma yarıçapları tez çalışmasında, kfilter-DDK3 verilerinde kullanılmış olan 240 km ile uyumlu olması açısından deneme aralıklarına alınmıştır.

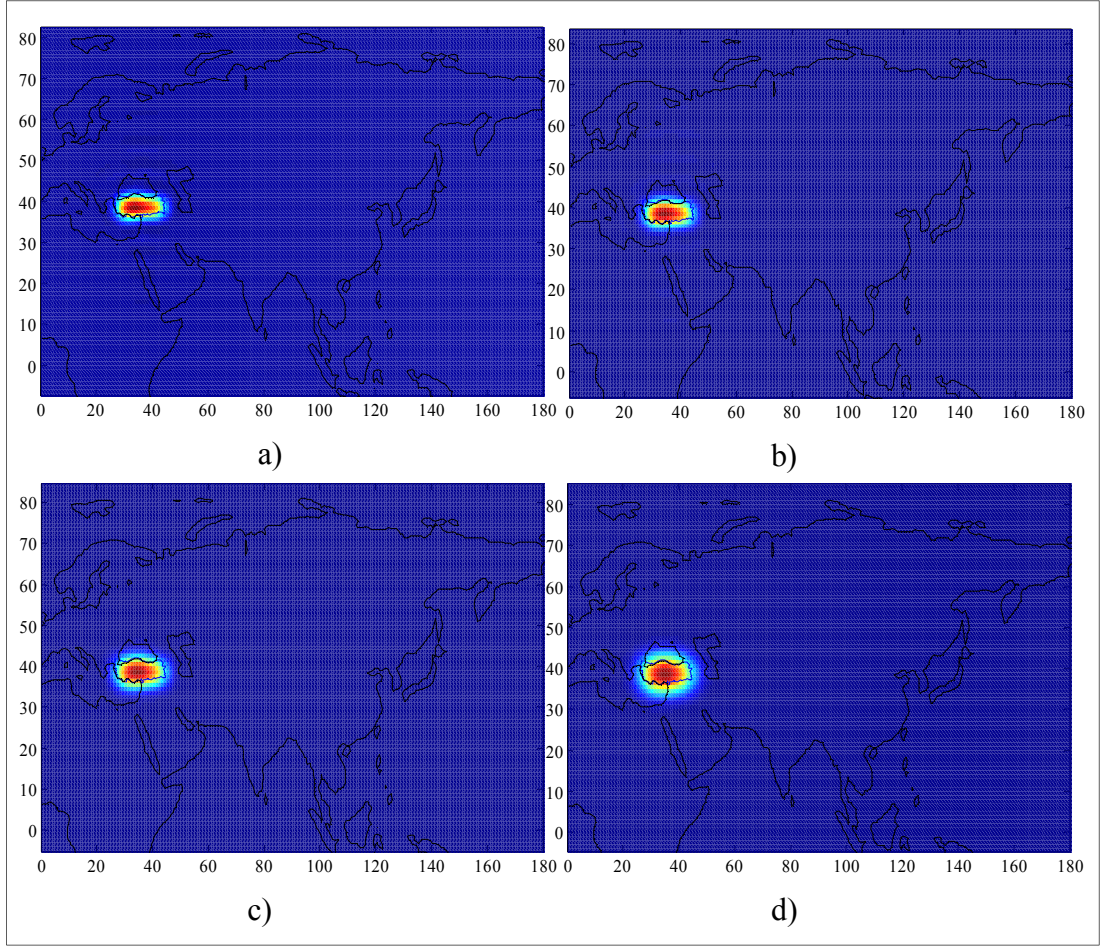


Şekil 5.18: Farklı yumuşatma yarıçapları uygulanan Türkiye bölge sinyalleri.



Şekil 5.18: Devam.

Şekil 5.18’de, 200 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş, Türkiye sinyalleri bölge içerisinde optimal görünse de, Şekil 5.19’da, Türkiye’nin küresel harmoniklerle gösteriminde (a), enlem ve boylam yönünde dalgalanmalar gözükmemektedir. Bu yüzden 200 km yarıçaplı Gaussian yumuşatması Türkiye’yi tanımlamada yetersiz kalmıştır. Şekil 5.18’de 240 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Türkiye sinyalleri, bölge içerisinde 1 değerinden uzaklaşsa da, Şekil 5.19’da, Türkiye’nin küresel harmoniklerle gösteriminde (b), dalgalanmalar giderilmiştir. Şekil 5.18’de, 300 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş Türkiye sinyalleri, bölge içerisinde 1 değerinden uzaklaşmış ve dalgalanmalar tamamen giderilmiştir, Şekil 5.19’da, Türkiye’nin küresel harmoniklerle gösteriminde (c), bölgesel sinyaller bölgenin dışarısına taşmıştır. Şekil 5.18’de, 400 km yumuşatma yarıçapı ile iyileştirilmiş, Türkiye sinyalleri bölge içerisinde 1 değerinden oldukça uzaklaşmış, Şekil 5.19’da, Türkiye’nin küresel harmoniklerle gösteriminde (d), bölgesel sinyaller, bölgenin dışarısına yayılmıştır.



Şekil 5.19: Farklı yumuşatma yarıçaplarına sahip kernel yöntemiyle hesaplanmış Türkiye bölgesel sinyallerinin küresel harmoniklerle gösterimi a) 200 km, b) 240 km, c) 300 km, d) 400 km.

Değerlendirmeler sonucu Türkiye için en uygun yumuşatma yarıçapının 240 km olduğuna kanaat getirilmiştir.

### 5.2.3. GRACE ile Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Hesabı

Şekil 4.1’de akış diyagramı verilen GRACE veri işleme yöntemi izlenerek; Türkiye su depolarındaki değişim (TWS) hesaplanmıştır. Türkiye için; Ocak 2004 ve Haziran 2014 arasındaki 126 aylık, açınım derecesi 60 olan küresel harmoniklerdeki düşük dereceli katsayılar ( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ ,  $C_{20}$ ), SLR’den elde edilen katsayılar ile yer değiştirildi. Ortalama gravite modeli, 126 aylık küresel harmonik katsayılarının ortalaması şeklinde elde edilmiştir. 126 aylık küresel harmonik katsayılarından ortalama gravite modeli çıkarılarak aylık anomaliler hesaplanmıştır. Aylık anomalilere ‘P4M6’ filtresi uygulanarak katsayılar iyileştirilmiştir. Türkiye için

maskelenmiş küresel harmonik katsayıları ile filtrelenmiş ve gravite değişimlerini gösteren,  $\Delta C_{nm}^{strp}$ ,  $\Delta S_{nm}^{strp}$  GRACE küresel harmonik katsayıları eşitlik (2.26) kullanılarak Türkiye'nin su depolarındaki değişim (TWS) elde edilmiştir.

#### 5.2.4. GLDAS/Noah ile Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Hesabı

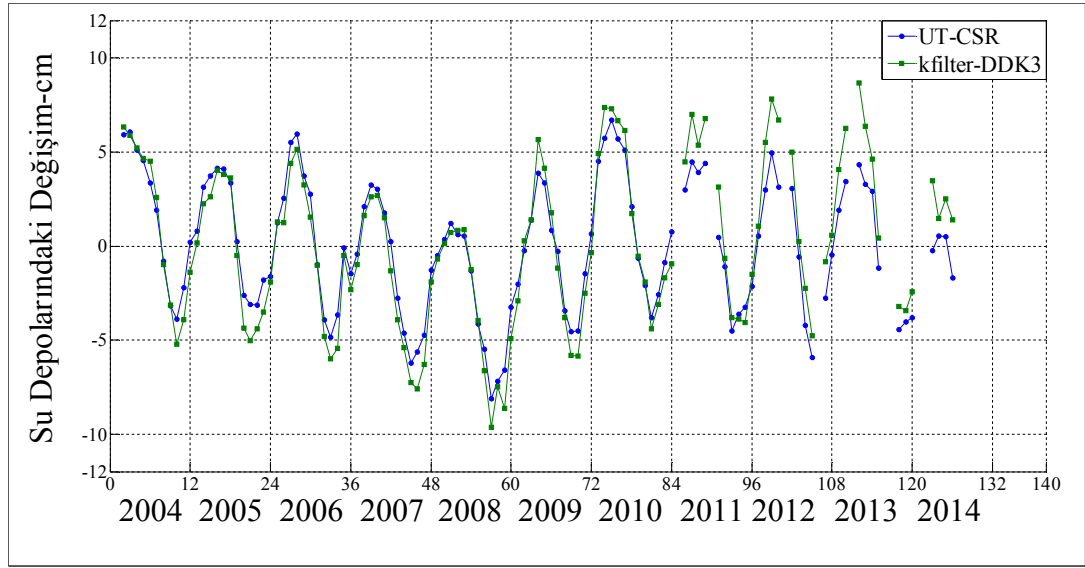
GLDAS/Noah verileri için, Şekil 4.2'de gösterilen veri işleme yöntemi izlenerek, Türkiye gridlerindeki su yüksekliklerinden küresel harmonik katsayılarının belirlenmesi ve bölgesel su depolarındaki değişimin hesaplanması olmak üzere iki değerlendirme adımı gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, Türkiye gridlerindeki su yüksekliklerinin, Stokes katsayıları şeklinde belirlenmesi için, GLDAS Giavonni interaktif arayüzü kullanılarak, Noah kara yüzey modelinden, Türkiye'nin iklim özellikleri göz önüne alındığında,  $1^\circ \times 1^\circ$  konumsal çözünürlüklü gridler üzerindeki toprak nemi (1, 2, 3, 4), bitki su muhtevası ve kar eşdeğer yüksekliği alınarak, her bir griddeki su değişkenleri toplanmış ve Türkiye tüm dünyadan maskelenmiştir.  $1^\circ \times 1^\circ$  gridlerdeki toplam su muhtevasının ölçülemeyen değerleri komşu noktalardan enterpole edilmiş, verisi olmayan değerler hesaplanarak bölge içerisindeki her bir gridin su toplamı hesaplanmıştır.  $1^\circ \times 1^\circ$  çözünürlüklü gridlerdeki toplam su muhtevasının küresel harmonik katsayılarına dönüşümü, eşitlik (2.27) ile hesaplanmış ve  $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  küresel harmonik katsayılarına ulaşılmıştır. Son olarak,  $\Delta \hat{C}_{nm}$  ve  $\Delta \hat{S}_{nm}$  küresel harmonikleri eşitlik (2.14) kullanılarak, bölgesel su depolarındaki değişim (TWS) elde edilmiştir. GLDAS/Noah verileri üzerinde herhangi bir ileri analiz (yumuşatma, filtreleme vb.) yapılmamış olup, her bir griddeki su toplamalarının bölgesel harmoniklerle ifade edildiği, Türkiye su depolarındaki değişimi yansıtmaktadır.

#### 5.2.5. Türkiye Su Depolarındaki Değişim

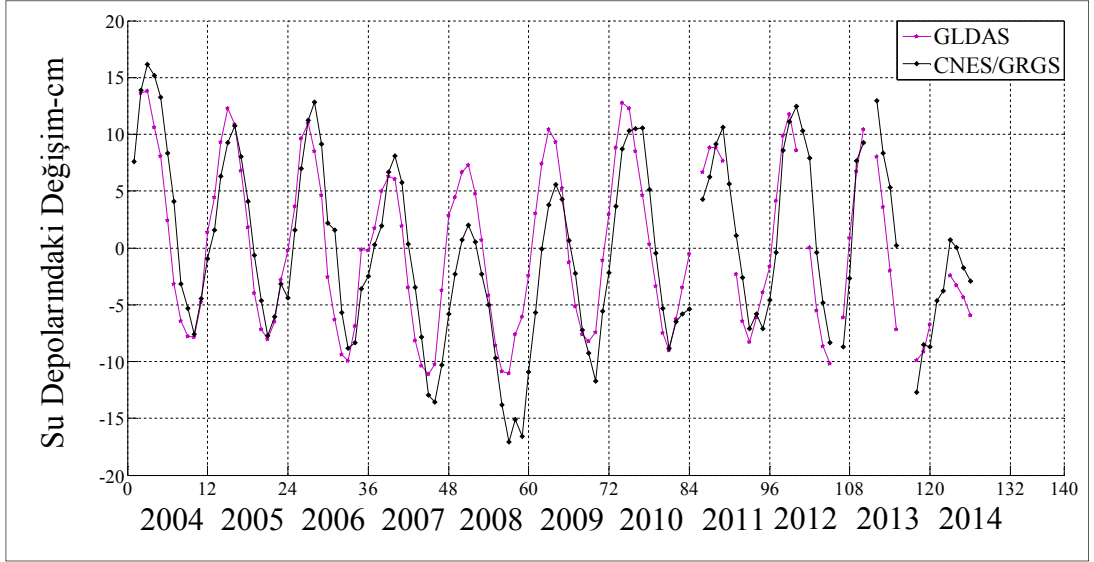
Tez çalışmasında UT-CSR, kfilter-DDK3 verileri kullanılarak, kernel yöntemi ile elde edilen, Ocak 2004 ve Haziran periyoduna ait, Türkiye'nin su depolarındaki değişim (TWS) değerleri Şekil 5.20'de gösterilmektedir. 126 aylık periyotta, UT-CSR ve kfilter-DDK3 verileri için Türkiye su depolarındaki değişim genlikleri 8 cm ve -10 cm aralıklarında değişmektedir. İleri analiz işlemlerinden geçmiş kfilter-

DDK3 verileri ile tez çalışması içerisinde P4M6+Guassian (240) ile filtrelediğimiz UT-CSR verileri arasında maksimum fark  $\sim 4$  cm'dir.



Şekil 5.20: Türkiye'nin su depolarındaki değişim 1.

Şekil 5.20'de farklı veri merkezlerinden elde edilen su depolarındaki değişimin, yıllık ve sezonsal farklarını gösteren noktaların %75'inin birbiriyle örtüşmesi, UT-CSR üzerinde yaptığımız ileri analiz yöntemlerinin, Türkiye su depolarındaki değişimi tespitini cm hassasiyetinde elde ettiğimizi göstermektedir. Buna ek olarak UT-CSR, kfilter-DDK3'ün kıyaslanması ile UT-CSR üzerinde uyguladığımız ileri analiz işlemlerinin, tez çalışmasında kullanılan hesaplama yöntemlerinden istenilen sonucu aldığımızı göstermiştir.



Şekil 5.21: Türkiye'nin su depolarındaki değişim 2.

GLDAS, CNES/GRGS verileri kullanılarak, Ocak 2004 ve Haziran 2014 periyoduna ait, Türkiye'nin su depolarındaki değişim (TWS) değerleri Şekil 5.21'de gösterilmektedir. 126 aylık periyotta GLDAS ve CNES/GRGS verileri için Türkiye su depolarındaki değişim genlikleri 16 cm ve -17 cm aralıklarında değişmektedir. Şekli 4.3'te belirtilen veri işleme adımları ile elde edilen, GLDAS Türkiye su depolarında değişim değerleri ile CNES/GRGS interaktif arayüzden elde edilen Türkiye su depolarında değişim değerlerinin, yıllık ve sezonsal farklarını gösteren noktalar arasındaki maksimum fark ~10 cm'dir.

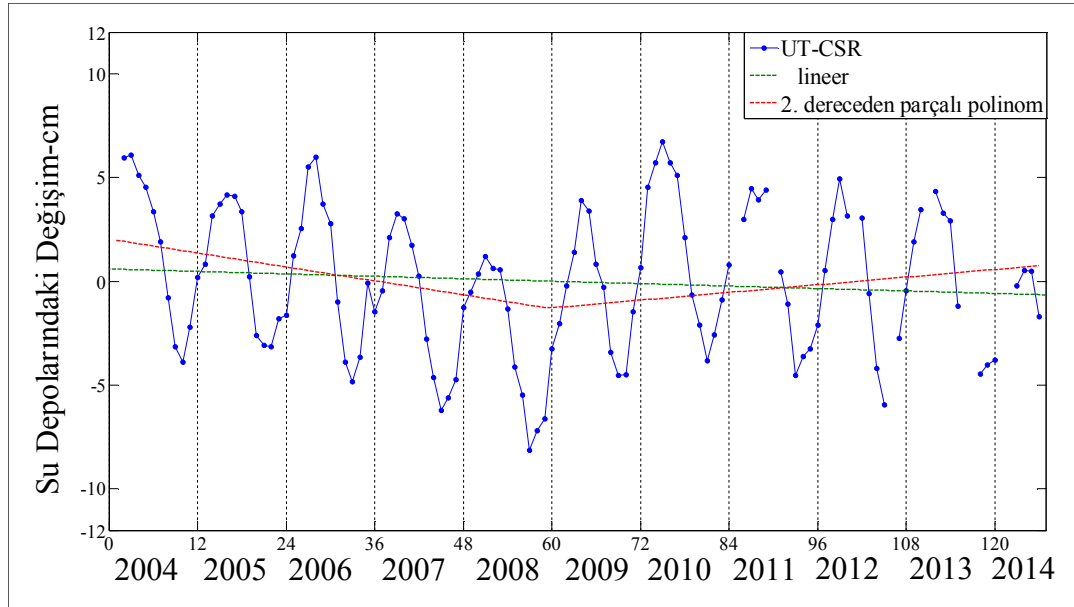
### 5.2.6. Türkiye Su Depolarındaki Değişimin Değerlendirilmesi

Şekil 5.22'de, UT-CSR verilerinden, yaklaşık kernel yöntemiyle elde edilen Türkiye su depolarındaki değişim görülmektedir. Türkiye'nin su depolarındaki uzun dönemli değişimi, trendini ve de uzun dönemli değişimdeki kriz (kritik) noktasını görebilmek adına, UT-CSR verisine lineer ve 2. Dereceden parçalı polinom geçirildi.

Şekil 5.22'de lineer değişim 0.57 cm ile başlayan trendin 126 ay sonra -0.64 cm olduğu, Türkiye'nin uzun dönemli su depolarındaki değişim trendinin düştüğü göstermektedir. UT-CSR sonuçlarının ikinci derecen parçalı polinomu, 126 aylık Türkiye su depolarındaki değişimin, 2008 yılında kırma (kritik nokta) oluşturduğunu gördük. Türkiye'de kuraklık olaylarının şiddetli olarak yaşandığı yıllar; 1971-1974, 1983-1984, 1989-1990, 1996, 2001 ve 2007-2008 olarak kaydedilmiştir [57], [58].

Bu kuraklık dönemi özellikle tarımsal ve hidrolojik kuraklık halinde Kasım/Aralık 2006'dan başlayarak, Aralık 2008'e kadar süren, 2007-2008 kuraklık dönemini oluşturmaktadır [59]. Türkiye'de kuraklık üzerinde yapılan pek çok çalışma [60], [61] ve bültenler [61], [62], [63], [64], özellikle 2008 yılındaki kuraklığı işaret etmektedir.

Öyle ki, 2008 yılındaki kuraklık sebebiyle, 19 Temmuz 2008 yılında Resmi Gazetede yayınlanan 'Türkiye'de Meydana Gelen Kuraklık Nedeniyle Zarar Gören Çiftçilere Nakdi Desteğin Hibe Olarak Verilmesine ve Bu Çiftçilerin T.C. Ziraat Bankası ile Tarım Kredi Kooperatiflerine Olan Tarımsal Kredi Borçlarının Ertelenmesine İlişkin' Bakanlar kurulu kararı, kuraklığın ciddi boyutlara ulaştığının bir işaretidir.



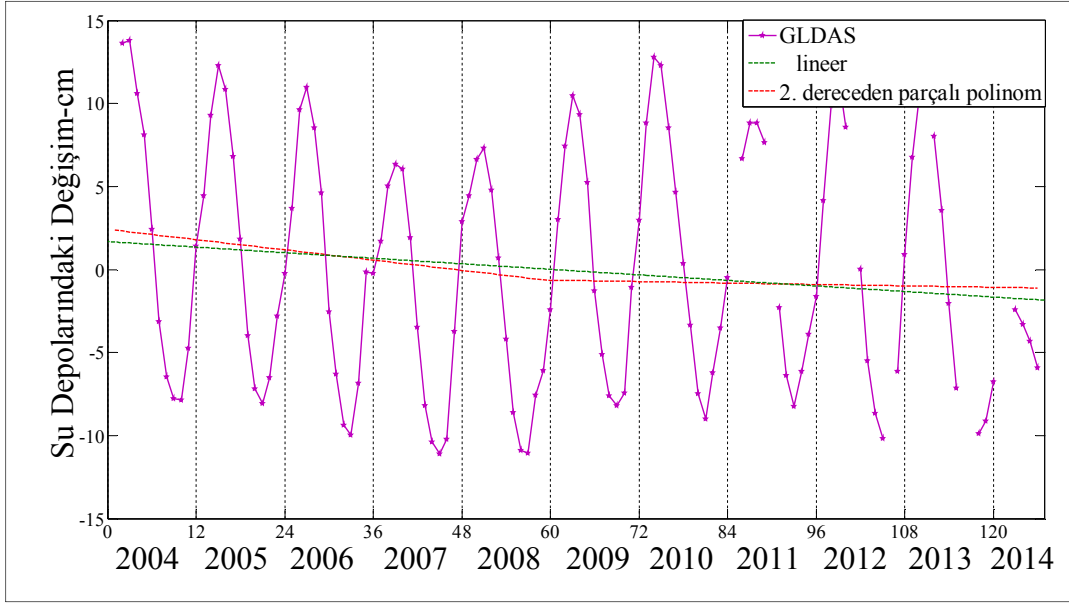
Şekil 5.22: Türkiye'nin su depolarındaki değişim (UT-CSR).

Tez çalışması kapsamında 2004-2014 yılları arasına rastlayan, 2006-2008 yılları, 11 yıllık çalışma aralığımızın en düşük değerlerini oluştururken, Şekil 5.22'de özellikle parçalı polinomun, 2008 yılındaki kriz (kritik) noktası, kuraklığın en şiddetli yaşandığı yıl olarak görülmektedir.

Şekil 5.23'de, GLDAS verilerinden elde edilen, Türkiye su depolarındaki değişim görülmektedir. Türkiye'nin su depolarındaki uzun dönemli değişimi, trendini ve de uzun dönemli değişimdeki kriz (kritik) noktasını görebilmek adına, GLDAS verisine lineer ve 2. Dereceden parçalı polinom geçirildi. GLDAS



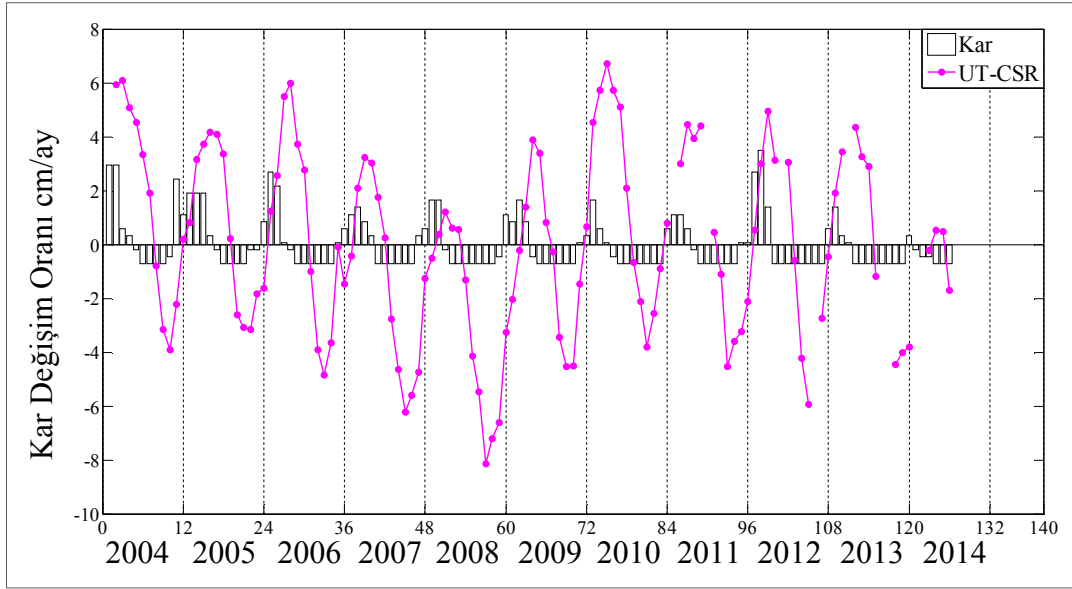
sonuçlarının ikinci derecen parçalı bir polinomu, 126 aylık Türkiye su depolarındaki değişimin, yine 2008 yılındaki kırılma (kritik nokta) oluşturduğunu gördük. Doğrusal trendleri ise 1.63 cm den -1.82 cm'ye düşerek azalma göstermiştir. Farklı veri merkezleri ve farklı hesaplama yöntemlerine rağmen kırılma (kritik) noktasının aynı yılda kalmasına neden olmuştur. Şekil 5.23 Türkiye'nin 2006-2008 yılları arasındaki su azalışını, özellikle 2008 yılını, 11 yıllık periyodun en düşük seviyesini yakaladığı görülmektedir.



Şekil 5.23: Türkiye'nin su depolarındaki değişim (GLDAS).

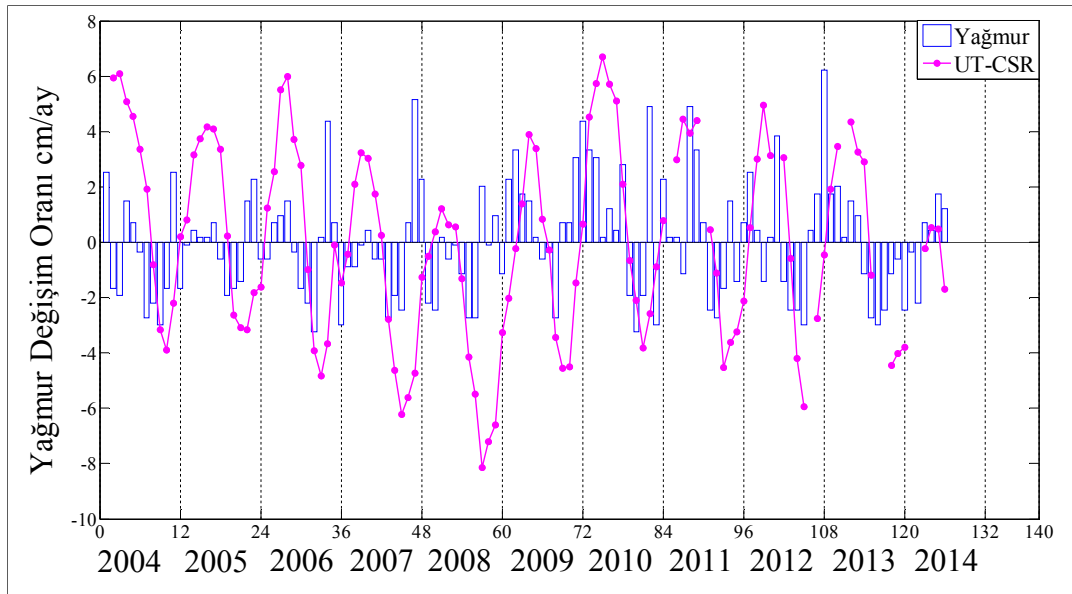
Zambezi test alanında Şekil 5.9'da görülen fark, Türkiye'de de Şekil 5.21'te gözlemlenmiş ve GLDAS ile elde edilen sonuçların diğer değişimlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Kernel yönteminden kaynaklanan, kaybedilen sinyallerin telafi edilebilmesi için, GRACE ile elde edilen tüm sonuçların ölçeklendirmeye ihtiyaç duyduğu anlaşılmıştır.

Türkiye'nin yıllara göre kar değişim oranını yansıtan Şekil 5.24 ve Türkiye'nin yıllara göre yağış değişim oranını yansıtan Şekil 5.25'te, Türkiye'de kurak geçen yıllar 2006-2008 değerlendirildiğinde; sıfırın altında kalan değerlerin yine bu tarihler arasına rastladığı görülmüştür.



Şekil 5.24: Türkiye'nin yıllara göre kar değişim oranı.

Özellikle 2008 yılı kar ve yağmur değişiminin [50], [65], 9-10 ay boyunca sıfırın altında seyrettiği gözükmektedir. Ülkemizde su depolarındaki değişimi etkileyen en önemli faktörlerden ikisi olan kar ve yağmur değişimleri ile UT-CSR verilerinden elde ettiğimiz su depolarındaki değişimin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 5.24 ve 5.25'te kar ve yağmur oranındaki artış ve azalışlar, direkt olarak su değişimlerini etkilemekte ve UT-CSR ile elde edilen su depolarındaki değişimin önemli parametrelerini oluşturmaktadır.



Şekil 5.25: Türkiye'nin yıllara göre yağmur değişim oranı.

## 6. SONUÇLAR ve YORUMLAR

GRACE, uydu sistemi ile ilk kez tek bir kaynaktan yeryuvarı gravite alanı zamansal değişimine ilişkin önemli bilgiler sağlanmaktadır. Bu bilgiler, aylık olarak harmonik katsayılar biçiminde kullanıcılara sunulmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye için, UT-CSR veri merkezinden temin edilen 2004 Ocak–2014 Haziran aralığını kapsayan 126 aya ilişkin harmonik katsayıları, ICGEM kfilter-DDK3 filtrelenmiş harmonik katsayıları, GLDAS/Noah  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  konumsal çözünürlükteki toprak nemi, bitki su muhtevası, kar eşdeğer yükseklik verileri ve CNES/GRGS interaktif arayüzden temin edilen bölgesel eşdeğer su yükseklikleri kullanılmıştır. Farklı veri setleri üzerinden Türkiye su depolarındaki değişim ve bu değişime etki eden parametreler araştırılarak, su depolarındaki değişimin anlamlı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Bölgesel ölçekli su değişim çalışmalarındaki temel amaç; GRACE çözümlerinde var olan hataları minimize ederek bölgesel su tespiti yapmaktır. Bu sebeple, 2002'den bu güne, yaygın olarak kullanılan yöntemlerden kernel metodu, Türkiye üzerinde uygulanmıştır. Kernel yöntemlerindeki ana düşünce bölgeyi belirleyen bir fonksiyon oluşturarak, tüm dünya için üretilen GRACE küresel harmonik katsayılarını, bölgesel kimlikte tanımlamaktır. Hem ölçme hatalarını hem de sızıntı hatalarını minimize edebilen kernelin, Türkiye için uygun yarıçapı deneme yöntemleri ile belirlenerek, UT-CSR ve kfilter-DDK3 olmak üzere iki farklı veri üzerinden Türkiye'nin su depolarındaki değişim maksimum 4 cm farkla hesaplanmış ve veri işleme adımlarının tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Bölgesel su depolarındaki değişimin kernel yöntemi ile belirlenmesindeki en temel problem bölgesel katsayılar için uygulanan yumuşatma filtresidir. Tez çalışmasında pek çok farklı boyutlarda filtre yarıçapı denenmiş ve artan yarıçap ile bölgesel sinyallerin değerinin küçüldüğü, bunun da bölgesel su değerini azalttığı gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasında Türkiye'nin su depolarındaki değişimi farklı veri formatında hesaplamak üzere GLDAS/Noah verileri kullanılmıştır. Türkiye'nin  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  lik gridleri üzerindeki toplam su muhtevasını, küresel harmonik katsayıları cinsinden ifade ederek, su depolarındaki değişim sonuçlarını elde edilmiştir. CNES/GRGS interaktif arayüzünden ise Türkiye eşdeğer su yüksekliği değerleri temin edilerek GLDAS ile karşılaştırıldığında, sonuçlar birbirine uyumlu olduğu görülmüştür. GLDAS ile

hesaplanan su depolarındaki değişim sonuçları, UT-CSR, kfilter-DDK sonuçları ile de karşılaştırıldığında büyük farkların olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni kernel yönteminde kaybedilen bölge sinyalleridir. Bu farklılıklar, GLDAS/Noah'dan elde edilen küresel harmonik katsayılar, GRACE katsayılarına uygulanan ileri analiz teknikleri uygulanacak ve sonuçları, ilk değerleri ile kıyaslanarak ileri analizlerle kaybedilen sinyaller için ölçek faktörü şeklinde tarif edilebilir. Sonra ölçek faktörü GRACE sonuçları ile çarpılarak, kaybedilen su sinyalleri telafi edilebilmektedir.

GRACE UT-CSR sonuçları ile Türkiye su depolarındaki uzun dönemli değişimler tespit edilmiştir. Bu değişimlerin kritik noktalarının gözlemlenmesi için 2. dereceden parçalı polinom kullanılarak, Türkiye'de daha önceden kuraklık üzerine yapılmış çalışmalarda da son 10 yılın en kurak yılı olarak belirtilen 2008 yılı tespit edilmiş ve su depolarındaki değişim trendinin 2004-2014 dönemi itibariyle düşüşte olduğu gözlemlenmiştir.

Türkiye'nin su depolarındaki değişimleri en fazla etki eden çevresel parametrelerden kar ve yağmurun aylık cm cinsinden ifade edilen değişim değerleri, tez çalışmasında UT-CSR sonuçları ile paralellik göstererek, artış ve azalışları su depolarındaki değişimleri direkt etkilediği görülmüştür.

Son yıllarda GRACE ile yapılan bölgesel su değişimi ile ilgili pek çok çalışmada, kernel yöntemi halen kullanılmakta olup, GLDAS, yersel hidrolojik modeller, yersel ölçmeler, iklim parametreleri değişimlerini veren uzaktan algılama uyduları ile desteklenen GRACE çözümleri ile su depolarındaki değişimler geliştirilmektedir.

Ancak GRACE ile Türkiye su depolarındaki değişimlerin tespiti üzerine günümüze değin, pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu anlamda tez çalışmasının, yapılan ilk çalışmalardan olması ve ileriki çalışmalara yol gösterici olabilmesi sebebiyle, literatürdeki en genel ileri analiz teknikleri kullanılarak, ilk sonuçlar elde edilmiştir. Bu anlamda özellikle bölge su değerlerini en fazla etkileyen, filtreleme yöntemlerinden Guassian yumuşatma filtresi ve bölgesel fonksiyonun, su değerlerini oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, GRACE sonuçlarının, Türkiye'nin reel su değerlerine ulaşabilmesi için GLDAS ile elde edilen su değerleri kullanılarak ölçeklendirilmesi gerekmektedir.

Başlangıçta 5 yıllık operasyon süresi ile fırlatılan GRACE uyduları, NASA ve DLR'nin 2010 yılında, 2015'e kadar misyonunu sürdürmesi konusunda ortak karar almış ve bu yıl içerisinde de misyonunu tamamlayacaktır.

Türkiye'nin uzun dönemli su depolarındaki değişimler, özellikle su politikalarımızı değerlendirmemize alternatif sağlayarak, akıllı su yönetimi stratejilerin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır. İleriki çalışmalarımızda, GLDAS, yersel ölçmeler ve atmosferik gözlem uydularından faydalanarak, farklı ileri analiz teknikleri ile tez çalışmamız ışığında Türkiye'nin su depolarındaki değişim geliştirecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Swenson S., Wahr J., (2002b), “Monitoring Changes in Continental Water Storage with GRACE”, *Space Science Reviews*, 108, 345-354.
- [2] Web 2, (2014), <http://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/GRACE/>, (Erişim Tarihi: 08/01/2014).
- [3] Syed T. H., Famiglietti J. S., Rodell M., Chen J., Wilson C. R., (2008), “Analysis of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE and GLDAS”, *Water Resources Research*, 44 (2), W02433.
- [4] Rodell, M., Houser P. R., Jambor U., Gottshalkck J., Mitchell K., Meng C. J., Arsenault K., Cosgrove B., Rdakovich J., Bosilvavich M., Entin J. K., Walker J. P., Lohmann D., Toll D., (2004), “The Global Land Data Assimilation System”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 381–394.
- [5] Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J. S., (2009), “Satellite-Based Estimates of Groundwater Depletion in India”, *Nature*, 460 (7258), 999-1002.
- [6] Strassberg G., Scanlon B. R., Chambers D., (2009), “Evaluation of Groundwater Storage Monitoring with the GRACE Satellite: Case Study of the High Plains Aquifer, Central United States”, *Water Resources Research*, 45 (5), W05410.
- [7] Rodell M., Famiglietti J. S., (2001), “An Analysis of Terrestrial Water Storage Variations in Illinois with Implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)”, *Water Resource Research*, 35 (5), 1327-1339.
- [8] Simav M., (2012) “Uydu ve Model Verilerine Dayalı Akdeniz Su Kütlesi Değişimleri”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [9] Chen J. L., Rodell M., Wilson, C. R., Famiglietti J. S., (2005a), “ Low Degree Spherical Influences on Gravity Recovery and Climate Experiment Water Storage Estimates”, *Geophysical Research Letters*, 32 (14), L14405.
- [10] Chen J. L., Wilson C. R., Seo K. W., (2006), “Optimized Smoothing of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-Variable Gravity Observations”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 111, B06408.
- [11] Wahr J. M., (2007), “Time Variable Gravity from Satellites”, *Treatise on Geophysics*, 3, 231-237.
- [12] Wahr J. M., (1998), “Time Variability of the Earth’s Gravity Field: Hydrological and oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 103 (B12), 30205-30229.

- [13] Swenson S., Wahr J., (2002a), "Methods for Inferring Regional Surface-Mass Anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment Measurements of Time Variable Gravity", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 107 (B9), ETG-3.
- [14] Bakker H. M., (2005), "Gravity Measurements for Hydrological Applications", Master Dissertation, Astrodynamics and Satellite Systems Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology.
- [15] Tangdamrongsub N., Hwang C., Kao Y. C., (2011), "Water Storage Loss in Central and South Asia from GRACE Satellite Gravity: Correlations with Climate Data" *Natural Hazards*, 59 (2), 749-769.
- [16] Kless R., Zapreeva E. A., Winsemius H. C., Savenije H. H. G., (2007), "The Biases in GRACE Estimates of Continental Water Storage Variations", *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (4), 1227-1241.
- [17] Kless R., Liu X., Wittwer T., Gunter B. C., Revtova E. A., Tenzer R., Ditmar P., Winsemius H. C., Savenije H. H. G., (2008), "A Comparison of Global and Regional GRACE Models for Land Hydrology", *Surveys in Geophysics*, 29 (4-5), 335-339.
- [18] Web 1, (2014), <https://www.nrcan.gc.ca/earthsciences/geomatics/geodetic/reference-systems/9052>, (Erişim Tarihi: 10/02/2014).
- [19] Stubbs A., (2002), "Recent Developments in Satellite Missions to Determine the Earth's Gravity Field", Projects Summary, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales.
- [20] Üstün A., (2006), "Gravite Alanı Belirleme Amaçlı Uydu Misyonları: CHAMP, GRACE, GOCE ve İlk Sonuçlar", *Harita Dergisi*, 136, 16-30.
- [21] Web 10, (2014), <http://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/grace/>, (Erişim Tarihi: 01/04/2014).
- [22] Web 8, (2014), [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/Grace/spacecraft/indexprt.htm](http://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/spacecraft/indexprt.htm), (Erişim Tarihi: 02/05/2014).
- [23] Web 3, (2014), [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GRACE](http://www.nasa.gov/mission_pages/GRACE), (Erişim Tarihi: 01/01/2014).
- [24] Web 4, (2014), <http://www.gsfc.nasa.gov>, (Erişim Tarihi: 01/01/2014).
- [25] Schmidt R., Flechtner F., Meyer U., Neumayer K. H., Dahle C., König R., Kusche J., (2008), "Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites", *Surveys in Geophysics*, 29, 319-344.
- [26] Web 5, (2014), [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/Grace/spacecraft/](http://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/spacecraft/), (Erişim Tarihi: 01/02/2014).

- [27] Web 6, (2014), <http://www.csr.utexas.edu/GRACE/spacecraft/config.html>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [28] Weigelt M. L., (2007), “Global and Local Gravity Field Recovery from Satellite to Satellite Tracking”, Doctoral Dissertation, Universty of Clagary, Alberta.
- [29] Kim J., Lee S. W., (2009), “Flight Performance Analysis of GRACE K-band Ranging Instrument with Simulation Data”, *Acta Astronautica*, 65, 1571-1581.
- [30] Web 7, (2014), <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satelliteemissions/g/grace-fo>, (Erişim Tarihi: 03/04/2014).
- [31] Watkins M. M., Gruber T., Bettadpur S. V., (2004), “Science Data System Development Plan”, Revision C, NASA Missions GRACE, 327-710.
- [32] Bettadpur S., (2012), “GRACE Product Specification Document”, GRACE Documentation, v 4.6, NASA Missions Gravity Recovery and Climate Experiment, 327-720.
- [33] Landerer F. W., Swenson S. C., (2012), “Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates”, *Water Resources Research*, 48 (4), W04531.
- [34] Han D., Wahr J., (1995), “The Viscoelastic Relaxation of a Realistically Stratied Earth, and a Further Analysis of Post-glacial Rebound”, *Geophysical Journal International*, 120 (2), 287-311.
- [35] Wellenhof H. M., Moritz H., (2005), “Physical Geodesy”, 2nd Edition, Springer-Verlag Wien.
- [36] Jekeli, C., (1981), “Alternative Methods to Smooth the Earth’s Gravity Field”, Technical Report No:137, Depertmant of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, USA.
- [37] Brown N. J., Tregoning P., (2010), “Quantifying GRACE Data Contamination Effects on Hydrological Analysis in the Murray–Darling Basin, Southeast Australia”, *Australian Journal of Earth Sciences*, 57 (3), 329-335.
- [38] Longuevergene L., Scanlon B. R., Wilson C. R., (2010), “GRACE Hydrological Estimates for Small Basins: Evaluating Processing Aproaches on the High Plains Aquifer, USA”, *Water Resources Research*, 46 (11), W11517.
- [39] Flectner F., (2007), “AOD1B Product Description Document for Product Release 01 to 04”, v 3.1, GRACE 327-750, GeoForschungsZentrum, Germany.
- [40] Barthelmes F., (2009), “Defination of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models”, Scientific Technical Report STR09/02, German Research Centre for Geosciences, Germany.



- [41] Han, S. C., Shum C. K., Jekeli C., Kuo C. Y., Wilson C., and Seo K. W., (2005), "Non-isotropic Filtering of GRACE Temporal Gravity for Geophysical Signal Enhancement", *Geophysical Journal International*, 163 (1), 18-25.
- [42] Zhang Z. Z., Chao B. F., Lu, Y., Hsu H. T., (2009), "An Effective Filtering for GRACE Time-variable Gravity: Fan Filter", *Geophysical Research Letters*, 36 (17), L17311.
- [43] Chen J. L., Wilson C. R., Famiglietti J. S., Rodell M., (2005b), "Spatial sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-VARIABLE Gravity Observations", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 110, B08408.
- [44] Swenson S., Wahr J., (2006), "Post-Processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data", *Geophysical Research Letters*, 33 (8), L08402.
- [45] Atayer E. S., (2012), "Yeryuvarı Gravite Alanının Aylık Grace Çözümleri İle İzlenmesi ve Duyarlılığı Üzerine Bir İnceleme", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [46] Web 9, (2014), [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daacbin/G3/gui.cgi?instance\\_id=GLDAS10\\_M](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daacbin/G3/gui.cgi?instance_id=GLDAS10_M), (Erişim Tarihi: 02/02/2014).
- [47] Sakumura C., (2014), "Comparison of Degree 60 and Degree 96 Monthly Solutions", GRACE Technical Note 10, Center for Space Research The University of Texas, Austin.
- [48] Young T., Mohlenkamp M., (2007), "Part III Functions and Data", Mathematics Department Note, Ohio University.
- [49] Web 17, [http://www.grida.no/graphicslib/detail/zambezi-river-basin\\_vegetation\\_3eee](http://www.grida.no/graphicslib/detail/zambezi-river-basin_vegetation_3eee), (Erişim Tarihi: 01/07/2014).
- [50] Marım G., Şensoy A., Şorman A. A., Şorman A. Ü., (2008), "Yukarı Fırat Havzası İçin Elde Edilen Kar Çekilme Eğrilerinin Zamansal Analizi ve Modelleme Çalışmaları", Kar Hidrolojisi Konferansı, 18-28, Erzurum, 27-28 Mart.
- [51] Akın M., Akın G., (2007), "Suyun Önemi, Türkiye’de Su Potansiyeli, Su Havzaları ve Su Kirliliği", Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 47, 105-118.
- [52] Web 11, <http://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27dekiiklim%C3%A7e%C5%9Fitleri>, (Erişim Tarihi: 02/02/2014).
- [53] Web 12, <http://www.toplumdusmani.net/modules/wordbook/entry.php?entryID=7183/turkiyedeki-akarsu-havzaları-nedir+turkiyedeki-akarsu-havzaları-ne-demek>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [54] Web 13, <http://www.orsam.org.tr/tr/SuKaynaklari/MerakEdilenler.aspxSoruID=2>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).

- [55] Günay G., (2011), “Türkiye’nin Yüzey Suları ve Yeraltı Suları Potansiyeli”, *Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim*, 132, 56-60.
- [56] Web 18, <http://www.dsi.gov.tr/toprak-ve-su-kaynaklari>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [57] Türkeş M., (1998), “Influence of Geopotential Heights, Cyclone Frequency and Southern Oscillation on Rainfall Variations in Turkey”, *International Journal of Climatology*, 18, 649–680.
- [58] Türkeş M., Akgündüz, A. S., Demirörs, Z., (2009), “Palmer Kuraklık İndisine Göre İç Anadolu Bölgesinin Konya Bölümündeki Kurak Dönemler ve Kuraklık Şiddeti”, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7, 129-144.
- [59] Kurnaz L., (2014), “Kuraklık ve Türkiye”, *IPM-MERCATOR Politika Notu*, İstanbul Politikalar Merkezi.
- [60] Kapluhan E., (2013), “Türkiye’de Kuraklık Ve Kuraklığın Tarıma Etkisi”, *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27, 487-510.
- [61] Web 15, <http://yesilgazete.org/blog/2014/02/22/sulak-alanlarda-bitmeyen-kuraklik-hulya-cesmeci/>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [62] Web 19, <http://www.hurriyet.com.tr/gundem/26971858.asp>, (Erişim Tarihi: 20/02/2014).
- [63] Web 14, <http://www.evrensel.net/haber/77576/turkiyede-iklim-degisiyor-mu>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [64] Web 16, <http://t24.com.tr/haber/kuraklikta-plan-var-eylem-yok,248890>, (Erişim Tarihi: 01/02/2014).
- [65] DMİ, (2009), “2008 Yılı İklim Verilerinin Değerlendirmesi“, Zirai Meteoroloji ve İklim Rasatları Dairesi Başkanlığı.

## ÖZGEÇMİŞ

Yosun Özlem YILDIRIM 1987 yılında Kırşehir’de doğdu. 2005 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünü 2010 yılında başarıyla tamamlayarak, 2012 yılında GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı, aynı yıl GYTE Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak başladı. Serbest Harita-Kadastro Büroları, Ahi Evran Üniversitesi, Ağrı Afet Acil Durum Müdürlüğü gibi kurumlarda Harita Mühendisi olarak görev yaptı.