دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک
گروه ژئودزی

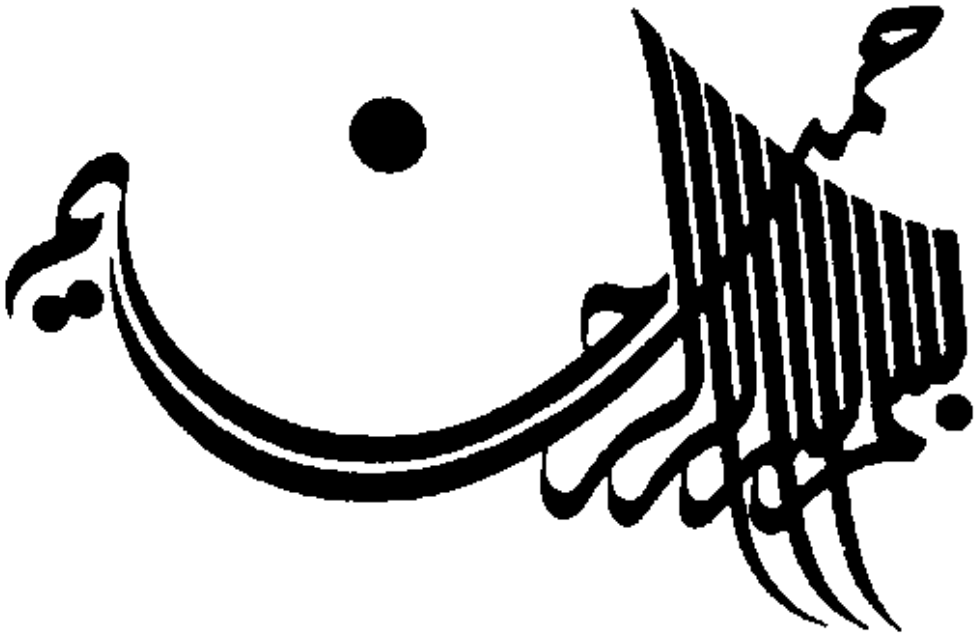
پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری
گرایش ژئودزی

پردازش داده‌های پتانسیلی ماهیانه ماهواره‌های GRACE جهت تعیین تغییرات پارامترهای میدان ثقل زمینی

نگارش:
الهه مختاری

اساتید راهنما:
دکتر مهدی نجفی علمداری
دکتر محمد علی شریفی

شهریور ۱۳۸۹



تقدیم به:

مادر و پدر عزیزم

فرم حق چاپ، نشر مالکیت پایان‌نامه

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده و یا کتابخانه دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر نام مرجع مجاز نمی‌باشد.

سپاسگزاری

نخست آفریدگارم را سپاس که فرصت مطالعه و تحقیق را برایم فراهم آورد.

به پدر و مادر مهربانم که همیشه مشوق و پشتیبان من بوده‌اند افتخار می‌کنم.

از جناب آقای دکتر مهدی نجفی علمداری و دکتر محمد علی شریفی به خاطر راهنمایی‌های بی دریغشان و به ویژه به خاطر صبر و حوصله‌شان بسیار سپاسگزارم.

استاد یا بهتر بگویم از آموزگار مهربان و عزیزم جناب آقای دکتر محمود محمد کریم به خاطر تمام زمان‌هایی که برای بحث کردن در بسیاری از زمینه‌های علمی و حتی فلسفی و جهان‌بینی، در اختیار بنده قرار دادند، بینهایت سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر آزموده اردلان نه تنها به خاطر داوری این پایان‌نامه که بیشتر به واسطه رفت و آمدهای بسیار من به دانشگاه تهران و روبه‌رو شدن با برخوردهای مهربانانه ایشان همچون یکی از دانشجویان این دانشگاه، بسیار قدردانی می‌نمایم. از جناب آقای دکتر مشهدی حسینعلی که امر داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و همینطور به خاطر آموختن مطالب مفید از ایشان در طول دوره تحصیل و حتی پس از آن، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

از دوست گرامی جناب آقای مهندس عبدالله زاده به خاطر همفکری‌های مثبت و سازنده‌ای که با من داشتند و همینطور به خاطر کمک‌های برنامه نویسی و حتی در اختیار قرار دادن چند برنامه به اینجانب، بسیار بسیار ممنونم. از کمک‌های جناب آقای مهندس دل‌آرام در چگونه خواندن فرمت گریب مدل هیدرولوژی گیلداس بسیار سپاسگزارم.

از تمامی کسانی که نام بردن از تک تک آن‌ها در این جملات محدود نمی‌گنجد نیز بسیار سپاسگزارم. قطعا بدون کمک‌های اساتید ارجمند و دوستان عزیزم هرگز و هرگز نمی‌توانستم کاری را به پیش ببرم. در پایان، برای تمامی آن‌ها سلامتی، سربلندی و کامیابی روزافزون را از خداوند منان آرزومندم.

الهه مختاری

مهر ۱۳۸۹

چکیده:

ماموریت ماهواره‌های دو قلو جاذبی GRACE از سال ۲۰۰۲، تغییرات زمانی میدان جاذبه زمین را در مقیاس جهانی زیر نظر گرفته است. فیلتر یا نرم کردن داده‌های GRACE یک کار ضروری در جهت کاهش سهم مولفه‌های طول موج کوتاه میدان جاذبه و در نتیجه دستیابی به سیگنال‌های قابل اعتماد جاذبی و متغیر در زمان می‌باشد.

اپراتورهای میانگین‌گیری (فیلترها) به دو دسته عمده ریاضی و تصادفی تقسیم می‌شوند. فیلترهای ریاضی به شعاع میانگین‌گیری وابسته بوده و نیازی به اطلاعاتی در مورد ساختار سیگنال و نویز موجود در داده ندارند. در مقابل، اپراتورهای تصادفی که به آن‌ها فیلترهای بهینه نیز می‌گویند، از یکسری اطلاعات اضافی (مانند ساختار سیگنال مطلوب، برآوردی از نویز موجود در داده و ...) استفاده می‌کنند تا اینکه بهترین تصمیم در مورد تفکیک سیگنال و نویز صورت گیرد. در این پایان‌نامه، اپراتورهای میانگین‌گیری کامل و گوسین از نوع فیلترهای ریاضی و فیلتر بهینه وینر از نوع فیلترهای تصادفی استفاده شده است. یکی از ساده‌ترین راه‌های رویارویی با خطاهای موجود، برش دادن سری هارمونیک‌های کروی تا درجه خاص می‌باشد. این روش را میانگین‌گیری کامل می‌نامند. ضرایب وزن فیلتر گوسین با استفاده از رابطه بازگشتی جکلی محاسبه می‌شود. فیلتر وینر بر مبنای اعمال شرط مینیمم مجموع مربعات اختلاف‌های میان سیگنال‌های ورودی انتخابی و سیگنال‌های خروجی فیلتر شده متناظر طراحی شده است. ایجاد شرط مینیمم مجموع مربعات نیاز به اطلاعاتی در مورد توان طیفی سیگنال‌های هارمونیک جاذبی انتخابی و نویز موجود در آن‌ها دارد که از متوسط درجه توان طیفی داده‌های GRACE قابل استخراج هستند. نشان داده شده است که فیلتر بهینه وینر، فیلتر پایین‌گذری است که به طورکلی به فیلتر گوسین شبیه می‌باشد.

همچنین، ضرایب وزن مربوط به این سه فیلتر بر روی ۵۵ ماه از داده‌های ماهیانه جاذبی GRACE اعمال شده و تغییرات کلی ذخیره آب درمنطقه ایران برآورد شده است. نتایج حاصل با تغییرات

کلی ذخیره آب به دست آمده از مدل هیدرولوژیکی GLDAS یعنی تغییرات پوشش برف به علاوه رطوبت خاک به همراه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از داده‌های چاه‌های پیزومتری در سطح ایران، مقایسه شده است. نتیجه اینکه، استفاده از روش میانگین‌گیری کامل، روش مناسبی برای حذف خطاهای داده‌های GRACE نمی‌باشد. اگر چه، یکی از مزایای روش وینر در مقایسه با فیلتر گوسین طراحی فیلتر بهینه وینر بر اساس اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری می‌باشد، نتایج نشان می‌دهند که تغییرات کلی سطح آب برآمده از داده‌های GRACE بعد از اعمال فیلتر گوسین، تطابق بهتری را با تغییرات کلی سطح آب برآمده از مشاهدات GLDAS به علاوه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، به همراه دارد.

فهرست مطلب‌ها

عنوان **صفحه**

چکیده ..... **ا**

فهرست مطلب‌ها ..... **.ت**

فهرست شکل‌ها ..... **ح**

فهرست جدول‌ها ..... **د**

فصل اول - مقدمه

۱-۱- پیشینه تحقیق ۳

۱-۲- اهداف موضوع تحقیق پایان‌نامه ۶

۱-۳- ساختار کلی پایان‌نامه ۷

فصل دوم – میدان پتانسیل جاذبه زمین و ماهواره‌های GRACE

۲-۱- ماهواره‌های GRACE ۱۰

۲-۱-۱- ساختار ماهواره‌های GRACE ۱۳

۲-۲- زمین و میدان جاذبه آن ۱۷

۲-۲-۱- بسط پتانسیل جاذبه زمین به سری هارمونیک‌های کروی ۱۷

۲-۲-۲- بسط پتانسیل جاذبه زمین در ژئودزی ماهواره‌ای ۱۸

۲-۳- بازیابی میدان جاذبه زمین با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای ۱۹

۲-۳-۱- پتانسیل جاذبی اغتشاش ۱۹

۲-۳-۲- پتانسیل جاذبی اغتشاش بر حسب المان‌های کپلری ۲۰

۲-۳-۳- آنالیز اغتشاشات مدار ماهواره ۲۱

۲-۳-۴- ارتباط میان پتانسیل اغتشاش R و آنامولی پتانسیل T ۲۲

۲-۴- ماموریت ماهواره‌ای جاذبه سنجی GRACE ۲۴

۲-۴-۱- ایده اندازه‌گیری میدان جاذبه با ماهواره‌های GRACE ۲۴

۲-۴-۲- اثر پارامتر میرایی در ارتفاع ماهواره‌های GRACE ۲۷

۲-۴-۳- بازیابی میدان جاذبه زمین از روی مشاهدات ماهواره‌های GRACE ۲۸

۲-۴-۴- قیدهای به کار رفته در هنگام بازیابی میدان جاذبه با ماهواره‌های GRACE ۳۱

۲-۴-۵- چند نکته مهم در مورد ضرایب هارمونیک کروی برآمده از GRACE ۳۳

۲-۴-۶- پردازش و آرشیو داده‌های GRACE ۳۴

۲-۵- روابط میان تغییرات میدان جاذبه و تغییرات کلی سطح آب‌ها ۳۵

۲-۶- درجه توان طیفی یک مدل ژئوپتانسیلی ۴۰

فصل سوم – وابستگی‌های مکانی و زمانی داده‌های پتانسیل ماهواره‌های GRACE

۳-۱- خطاهای موجود در داده‌های GRACE ۴۴
۳-۱-۱- خطای ناشی از ضرایب هارمونیک کروی ۴۴
۳-۱-۱-۱- اثر تداخل سیگنال‌های طول موج کوتاه میدان جاذبه ۴۴
۳-۱-۱-۲- اثر خطای پرش ۴۵
۳-۱-۱-۳- خطای فاصله ماهواره از سطح زمین ۴۷
۳-۱-۱-۴- خطای همبستگی ضرایب ۴۸
۳-۱-۲- اثر leakage ۴۹
۳-۲- جداسازی محدوده خطادار و عاری از خطا در ضرایب هارمونیک کروی حاصل از GRACE ۵۰
۳-۳- ماهواره‌های GRACE و میزان تغییرات ذخیره آب‌ها ۵۱
۳-۴- سایر کاربردهای ماهواره‌های GRACE ۵۳
۳-۴-۱- زیر نظر گرفتن جابه‌جایی آب در رو و در زیر سطح زمین ۵۴
۳-۴-۲- زیر نظر گرفتن تغییرات صفحات یخی و سطح آب‌های جهانی ۵۴
۳-۴-۳- مطالعه جریانات اقیانوسی در سطح و اعماق آن ۵۶
۳-۴-۴- زیر نظر گرفتن تغییرات پوسته جامد زمین ۵۷
۳-۴-۵- پروفیل‌های اتمسفری ۵۷

فصل چهارم – کاربرد فیلترها بر روی داده‌های GRACE

۴-۱- خطاهای تصادفی ۶۱
۴-۲- کانولوشن ۶۳
۴-۲-۱- کانولوشن در فضای اعداد حقیقی ۶۳
۴-۲-۲- کانولوشن در فضای دو بعدی کره ۶۵
۴-۳- ضرورت استفاده از فیلترها بر روی داده‌های GRACE ۶۶
۴-۴- فیلترهای به کار رفته بر روی داده‌های GRACE در این پایان‌نامه ۶۸
۴-۴-۱- تغییرات عمده سطح آب روی زمین ۶۸
۴-۴-۲- میانگین‌گیری کامل ۶۹
۴-۴-۳- میانگین‌گیری گوسین ۷۰
۴-۴-۴- فیلتر بهینه وینر ۷۲
۴-۴-۴-۱- طراحی فیلتر بهینه وینر یک بعدی ۷۳
۴-۴-۴-۲- طراحی فیلتر بهینه وینر در فضای دو بعدی کره ۷۵
۴-۵- تعیین درجه توان طیفی جدا کننده سیگنال از نویز در داده‌های GRACE ۷۷

فصل پنجم – محاسبات و نتایج عددی

۵-۱- نتایج مربوط به مقایسه میان فیلترهای کامل، گوسین و وینر در حذف خطاهای داده‌های GRACE ۸۵

فصل ششم – نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پیوست-الف- مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS ۱۰۳

پیوست-ب- مشاهده سطح آب‌های زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری ۱۰۶

فهرست منابع ۱۱۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

۲-۱- ماهواره‌های دو قلو GRACE ۱۱
۲-۲- مدار ماهواره‌های GRACE ۱۲
۲-۳- نمای درونی یکی از ماهواره‌های GRACE ۱۳
۲-۴- نمای زیرین یکی از ماهواره‌های GRACE ۱۵
۲-۵- نمای بیرونی یکی از ماهواره‌های GRACE ۱۶
۲-۶- المان‌های کپلری ۲۰
۲-۷- ساختار SST-HL ۲۵
۲-۸- ساختار SST-LL ۲۶
۲-۹- اثر پارامتر میرایی در سطوح ارتفاعی مختلف ماهواره ۲۷
۳-۱- همپوشانی زمینی ماهواره‌های GRACE ۴۶
۳-۲- متوسط توان‌های طیفی حاصل از ۷۵ ماه از داده‌های CSR از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ ..... ۴۸
۳-۳- تغییرات سطح کلی آب در ایران توسط ضرایب خام GRACE برای ماه پنجم از سال ۱۳۸۷ ..... ۴۹
۴-۱- تابع دلتا و تابع پاسخ ضربه ۶۴
۴-۲- کانولوشن در فضای اعداد حقیقی ۶۴
۴-۳- ضرایب وزن میانگین‌گیری کامل به شعاع ۴ درجه (۴۵۶ کیلومتر) و متناظر با $l_{\max} \cong 45$. a) شکل کرنل در فضای طیف (فضای فرکانس) و b) شکل کرنل در فضای مکان(فضای آرگومان) ۷۰
۴-۴- کرنل میانگین‌گیری گوسین به شعاع‌های ۴۵۶ و ۷۵۰ کیلومتر. a، c) فضای فرکانس و b ، d) فضای مکانی ۷۲
۴-۵- شمای کلی فیلتر وینر یک بعدی ۷۴
۴-۶- فیلتر بهینه وینر بر روی کره ۷۶
۴-۷- نمودارهای توزیع توان‌های طیفی مرجع GRACE بر حسب درجه هارمونیک طیف و مقایسه آن با میدان مرجع نظیر محاسبه شده از مدل هیدرولوژی GLDAS: دایره‌های توخالی متوسط درجه توان‌های طیفی GRACE، نمودار ضربدر متوسط درجه توان‌های طیفی مدل هیدرولوژی GLDAS [10]، دایره‌های تو پر متوسط درجه توان-های طیفی مربوط به خطاهای GRACE، خطوط مشکی سیگنال‌های جاذبی با در نظر گرفتن $b = ۱/۳$ و $b = ۱/۵$ و خط‌چین مشکی: نویز موجود در سیگنال‌های جاذبی با در نظر گرفتن $c = -۲/۴۰$ و $d = ۰/۰۵$ ۸۱
۴-۸- ضرایب وزن فیلتر بهینه وینر با $b = ۱/۳$ و $b = ۱/۵$ و گوسین به شعاع‌های ۴ و ۴/۵ درجه، در فضای طیفی و در مقیاس لگاریتمی ۸۳
۵-۱- تغییرات ارتفاع ژئوئید نسبت به میدان مرجع تولید شده از میانگین‌گیری از ۸۰ ماه از داده‌های GFZ قبل و بعد از اعمال فیلترهای کامل، گوسین و وینر مربوط به ماه پنجم از سال ۱۳۸۷ بر حسب میلیمتر ۸۸
۵-۲- تغییرات کلی سطح آب برآمده از داده‌های خام GRACE و پس از اعمال فیلترهای کامل، گوسین و وینر بر روی ماه پنجم از سال ۱۳۸۷ بر حسب میلیمتر ۸۹

۵-۳- مقایسه میان توان طیفی مدل ماهیانه تصحیح شده بعد از اعمال ضرایب وزن فیلتر بهینه وینر و گوسین، بر حسب ارتفاع ژئویید برای ماه پنجم از سال ۱۳۸۷ با توان طیفی خطادار (مربع‌های توخالی).....۹۱
۵-۴- مقایسه متوسط تغییرات کلی ذخیره آب برآمده از GRACE بعد از اعمال فیلتر وینر با $b = ۱/۵$ و گوسین به شعاع ۴ درجه با متوسط تغییرات کلی ذخیره آب برآمده از ترکیب مدل GLDAS و چاه‌های پیزومتری در منطقه ایران از سال ۸۲-۸۷ بر حسب میلیمتر.....۹۲
۵-۵- متوسط تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی برآمده از چاه‌های مشاهده‌ای و تغییرات رطوبت خاک به همراه آب موجود در پوشش برف برآمده از مدل هیدرولوژی GLDAS در منطقه ایران از سال ۸۲-۸۷ بر حسب میلیمتر.....۹۴

ب-۱- نقشه حوضه‌های آبریز اصلی کشور.....۱۰۸

ب-۲- تعداد چاه‌های مشاهده‌ای به تفکیک حوضه‌های آبریز اصلی در سال آبی ۸۵-۸۶.....۱۰۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

۵-۱- جزئیات داده‌های GRACE موجود در پوشه GFZ استفاده شده در این تحقیق ۸۶
۵-۲- جزئیات داده‌های GRACE موجود در پوشه CSR استفاده شده در این تحقیق ۸۷
۵-۳- مقایسه میانگین و انحراف استاندارد اختلاف‌های میان متوسط تغییرات کلی ذخیره آب برآمده از GRACE بعد از اعمال فیلترهای کامل، وینر و گوسین با متوسط تغییرات کلی ذخیره آب برآمده از ترکیب مدل GLDAS و چاه‌های پیزومتری (میلیمتر) - در منطقه ایران- از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷ ..... ۹۵
الف-۱- تعدادی از پارامترهای خروجی از مدل جهانی هیدرولوژی GLDAS ۱۰۴

فصل اول

مقدمه

بازیابی سیگنال‌های جاذبی پتانسیل زمین (ژئوپتانسیل) و تغییرات زمانی آنها در مقیاس‌های جهانی نیاز به اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای دارد. تا پیش از پرتاب CHAMP[1] در سال ۲۰۰۱ و به ویژه GRACE در سال ۲۰۰۲، مدل‌های ژئوپتانسیل و تغییرات زمانی پتانسیل توسط ماهواره‌هایی نظیر LAGEOS[2] با فاصله‌یابی لیزری میان ماهواره و ایستگاه‌های زمینی امکان‌پذیر بود. ارتفاع مدار ماهواره LAGEOS، ۶ هزار کیلومتری از سطح زمین می‌باشد. به دلیل ارتفاع زیاد مدار، تنها تعیین تغییرات فصلی و سکولار ضرایب درجه پایین پتانسیل جاذبی زمین امکان‌پذیر بود. با چنین مدل‌های ژئوپتانسیل مطالعه تغییرات فصلی اتمسفر، اقیانوس‌ها و آب‌های سطحی و همینطور تغییرات دائمی پوسته زمین در اثر پدیده بازگشت پوسته به دوره پیش از عصر یخبندان[3] میسر بود. اما کمبود ایستگاه‌های زمینی که این ماهواره‌ها را ردیابی کنند و همینطور فاصله زیاد این ماهواره‌ها از سطح زمین، محدودیت‌هایی را در قدرت‌های تفکیک مکانی و زمانی این مدل‌ها ایجاد می‌کند [1]؛ به طوری که حتی چگونگی تغییر طول موج‌های بلندتر میدان جاذبه در طول زمان نیز بسیار دشوار می‌نمود [2]. از سویی دیگر، فاصله زیاد ماهواره تا زمین باعث می‌شود که توان طیفی مولفه‌های طول موج کوتاه‌تر میدان جاذبه به سرعت کاهش پیدا می‌کند. برای بازیابی دقیق‌تر این طول موج‌ها، به ماهواره‌های با ارتفاع پایین‌تری نیازمند می‌باشد.

[1] CHAllenging Minisatellite Payload
[2] Laser Geodetic Satellite
[3] Post Glacial Rebound

می‌توان گفت که تا پیش از GRACE تنها تعداد کمی از مولفه‌های جاذبی متغیر در زمان قابل بازیابی بودند [3]. بنابراین، انتظار می‌رفت که با آمدن ماهواره‌های با مدار قطبی و ارتفاع پایین در حدود ۵۰۰ کیلومتر در پروژه‌ای با نام Gravity Recovery And Climate Experiment یا به اختصار GRACE، به عنوان ماهواره‌ای با سیستم اندازه‌گیری high-low به همراه اندازه‌گیری‌های دقیق شتاب و فاصله بین دو ماهواره، این محدودیت‌ها بر طرف شوند [1].

پروژه GRACE یکی از ماموریت‌های ماهواره‌ای که به منظور تعیین میدان پتانسیل جاذبی زمین صورت گرفته است، با کار مشترک میان ناسا[1] و DLR[2] ساخته شده و در ۱۷ مارچ ۲۰۰۲ از ایستگاه پلستیک[3] در روسیه به فضا پرتاب شده است. هدف اولیه از این ماموریت، در یک دوره زمانی ۵ ساله، به دست آوردن مدل‌های ژئوپتانسیل جهانی و تغییرات زمانی پتانسیل جاذبی زمین می‌باشد؛ چنین مدل‌هایی می‌توانند در اقیانوس شناسی، آب شناسی، یخ شناسی و تعیین حرکات پوسته جامد زمین مورد استفاده قرار گیرند [4]. هر دو ماهواره GRACE در یک مدار قطبی با زاویه میل ۸۹ درجه و تقریبا کروی در ارتفاع ۳۰۰-۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین و به فاصله ۵۰±۲۲۰ کیلومتر از یکدیگر در حال پرواز می‌باشند [5]. تغییرات فاصله نسبی میان دو ماهواره $\dot{\rho}$ با دقت یک میکرومتر بر ثانیه به صورت پیوسته به وسیله سیستم KBR[4] تعبیه شده در ماهواره‌ها، اندازه‌گیری می‌شوند. در ضمن، هر کدام از ماهواره‌ها دارای گیرنده GPS[5] می‌باشند که امکان تعیین دقیق مدار را فراهم نموده و همچنین مجهز به یک شتاب سنج با دقت 10^{-10} متر بر مجذور ثانیه بوده تا شتاب‌های غیر جاذبی وارد بر ماهواره همچون کشش اتمسفر، فشار ناشی از تشعشعات خورشیدی و ... را اندازه‌گیری نماید. سیستم منعکس کننده لیزر نصب شده در هر دو ماهواره امکان کالیبراسیون خارجی گیرنده‌های GPS را فراهم نموده و علاوه بر آن، با

[1] National Aeronautics and Administration Space
[2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
[3] Plesetsk
[4] K-Band Ranging System
[5] Global Positioning System

ترکیب مشاهدات حاصل از فاصله‌یابی لیزری از زمین با مشاهدات GPS، تعیین دقیق‌تر مدار ماهواره را امکان‌پذیر می‌نماید [4].

انتظار می‌رود تا GRACE، در مقیاس‌های زمانی فصلی و مقیاس‌های مکانی چند صد کیلومتر و بیشتر، تغییرات سطح آب‌ها را با دقتی کمتر از ۲ سانتیمتر و تغییرات فشارهای کف اقیانوسی با دقتی کمتر از ۱ میلی‌بار حساب کند. در مقیاس‌های زمانی دائمی، انتظار می‌رود که اطلاعات ارزشمندی را در مورد تغییرات صفحه‌های یخی که تاثیر شگرفی بر روی تغییرات آب و هوا در بازه زمانی طولانی و به ویژه روی تغییرات سطح آب دریاها دارد، در اختیار قرار دهد [1].

۱-۱- پیشینه تحقیق

پروژه GRACE تخمینی از میدان جاذبه زمین را به صورت منظم و ماهیانه در قالب مدل‌های ژئوپتانسیلی هارمونیک مشتمل بر مولفه‌های هارمونیک از درجه ۲ تا درجه و مرتبه ۱۲۰ ضرایب هارمونیک کروی معادل عوارض در ابعاد مکانی از ۴۰ هزار کیلومتر تا ۴۰۰ کیلومتر روی زمین در اختیار قرار می‌دهد [6]. بنابراین فرایندهایی که موجب جابه‌جایی جرم در ابعاد مکانی فوق در داخل و روی زمین می‌شوند و در پریود زمانی یک ماه رخ می‌دهند مانند تغییرات مربوط به فشارهای اتمسفری، فشارهای کف اقیانوسی و میزان ذخیره آب‌های سطحی را می‌توان با داده‌های GRACE زیر نظر گرفت [2]. به عبارتی دیگر، GRACE میزان تغییرات کلی ذخیره آب یا TWS[1] را که مجموع رطوبت موجود در لایه ریشه‌ای خاک، آب موجود در پوشش برف و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد را برآورد می‌کند. TWS می‌تواند در ارزیابی نمودن و بهبود دادن مولفه‌های هیدرولوژیکی مورد نیاز در مدل‌های آب و هوا شناسی در مقیاس‌های جهانی و حتی منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد [7]. تا کنون، مطالعات بسیاری در بررسی قابلیت GRACE در نشان دادن تغییرات کلی ذخیره آب صورت گرفته است. وار و مولینار[2] در

[1] Total Water Storage
[2] Whar & Molenaar

سال ۱۹۹۸ تغییرات میدان جاذبه زمین را با استفاده از خروجی مدل‌هایی چون هیدرولوژی، اقیانوس نگاری و اتمسفری تخمین زده و با استفاده از مشاهدات شبیه سازی شده نشان دادند که GRACE می‌تواند میزان تغییرات ضخامت لایه آب[1] را با دقتی در حدود ۲ میلیمتر و تغییرات فشارهای کف اقیانوسی (فشارهای هیدروستاتیکی) را با دقتی بهتر از ۰/۱ میلی‌بار فراهم کند [3]. اشمیت[2] و همکاران در سال ۲۰۰۴، داده‌های ماهیانه جاذبی GRACE را در تخمین زدن میزان تغییرات کلی سطح آب در مقیاس قاره‌ای بررسی نموده‌اند [8]. بعد از آن تپلی[3] و همکاران در سال ۲۰۰۴ پس از بررسی داده‌های ماهیانه GRACE، نتایج اولیه از قابلیت این ماهواره‌ها در تخمین سیگنال‌های هیدرولوژیکی ارایه نمود که در آن به دست آوردن تغییرات کلی ذخیره آب با استفاده از این داده‌های ماهیانه تا درجه و مرتبه ۷۰، با دقتی در حد ۲ سانتیمتر را نشان می‌دهد [9]. همچنین تحقیقات وار و همکاران در سال ۲۰۰۴ دقتی در حد ۱/۵ سانتیمتر را برای تعیین تغییرات ماهیانه ضخامت لایه آب بر روی خشکی‌ها و اقیانوس‌ها بیان می‌نمایند [10]. در همین راستا سونسن[4] و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقایسه‌ای میان میزان تغییرات کلی ذخیره آب حاصل از داده‌های GRACE با مشاهدات زمینی، در منطقه‌ای به مساحت ۲۸۰ هزار کیلومترمربع انجام داده‌اند [11]. همچنین ایکساگونگ[5] و همکاران در سال ۲۰۰۶ توسط داده‌های GRACE به بررسی تغییرات فصلی ذخیره آب در رود خانه یانگتز[6] در چین پرداخته‌اند [1]. رودل[7] و همکاران در سال ۲۰۰۷ قابلیت GRACE را در برآورد کردن تغییرات آب‌های زیرزمینی در منطقه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا پرداخته‌اند [12]. از دیگر تحقیقات می‌توان به اوانگه[8] و همکاران در سال‌های

[1] Water thickness
[2] Schmidt
[3] Tapley
[4] Swenson
[5] Xiaogong
[6] Yangtze
[7] Rodell
[8] Awange

۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ اشاره نمود که کاربرد GRACE در بررسی میزان تغییرات کلی سطح آب و خطر بروز خشکسالی در منطقه استرالیا را بررسی نموده‌اند [14,13].

خطاهای ایجاد شده به سبب تکنیک اندازه‌گیری با ماهواره‌های GRACE، محدودیت در قدرت تفکیک مکانی ماهواره، تاثیرات باقی مانده ناشی از درست مدل نکردن خطاهای aliasing و leakage در داده‌های GRACE، خطاهای ناشی از چگونگی پردازش مشاهدات GRACE، درست مدل نکردن نیروهای غیر جاذبی وارد بر ماهواره و وجود سایر خطاهای سیستماتیک به غیر از خطاهای تصادفی موجود در داده‌های GRACE استفاده مستقیم از آن‌ها را با محدودیت‌هایی همراه می‌کند. شاید بتوان یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در همین راستا را به دلیل ساختار قطبی این ماهواره که با زاویه میل ۸۹ درجه در حال گردش به دور زمین می‌باشد، مربوط دانست [2]. این موضوع سبب می‌شود که حجم زیادی از داده‌ها در مسیر پرواز شمالی- جنوبی تولید شده و به نوعی موجب ایجاد وابستگی‌های مکانی در این راستا شود [13]. این وابستگی‌ها خود را به صورت نوارهایی که در نقشه‌های جغرافیایی از شمال به جنوب کشیده شده‌اند (وابستگی‌های در طول جغرافیائی) نشان می‌دهند [2]. تمامی این خطاها و محدودیت‌ها دست به دست هم داده تا با افزایش درجه و مرتبه، خطاهای موجود در داده‌های GRACE، به سرعت افزایش یابند؛ به ویژه به هنگام استفاده مستقیم از آن‌ها در مناطق کوچک‌تر و در کاربردهایی مثل زیر نظر گرفتن چرخه هیدرولوژیکی که به دقت بیشتری در برآورد نمودن سیگنال‌های مورد نظر نیاز دارد، منجر به تولید شدن نتایجی غیر واقعی از تغییرات کلی سطح آب در منطقه مورد مطالعه می‌شود. به همین دلیل، ضرورت استفاده از فیلترهای پایین‌گذر (فیلترهای پس پردازنده) با هدف کاهش سهم ضرایب با درجات بالاتر در محاسبات و رسیدن به نتایج دقیق‌تر توسط جکلی[1] در سال ۱۹۸۱مطرح شد [15].

تا کنون برای رویارویی با خطاهای موجود در داده‌های GRACE فیلترهای متعددی طراحی شده است. به طور کلی، فیلترهای مورد استفاده بر روی داده‌های ماهیانه GRACE را، به دو دسته تقسیم‌بندی

[1] Jekeli

می‌کنند. دسته اول فیلترهایی هستند که دارای پشتوانه ریاضی (Deterministic) برای فرموله کردن می‌باشند. این فیلترها با روش میانگین‌گیری فرموله شده و کیفیت آنها بستگی به شعاع میدان میانگین‌گیری دارند. این فیلترها کوشش دارند از طریق کاهش نویز ضرایب ژئوپتانسیل درجه بالا، قدرت تفکیک مکانی مدل ژئوپتانسیل ماهواره را افزایش دهند. از جمله این فیلترها می‌توان به فیلتر ایزوتروپیک گوسین ساده که در مقاله‌های بسیاری همچون [2]،[3] و در پایان‌نامه دل‌آرام در سال ۱۳۸۶ در منطقه ایران استفاده شده است، اشاره نمود. از دیگر فیلترهای دسته اول، می‌توان به فیلترهای غیرایزوتروپیک اشاره نمود که با در نظر گرفتن ساختار غیر ایزوتروپیک خطاهای موجود در داده‌ها تنظیم شده‌اند. فیلترهای غیر ایزوتروپیک علاوه بر درجه، بر حسب مرتبه هارمونیک کروی مدل ژئوپتانسیل طراحی شده‌اند. از جمله این فیلترهای غیر ایزوتروپیک می‌توان به مقاله‌های [16]، [17] و [18] اشاره نمود. مقاله‌هایی چون [19] و [20] فیلترهایی را طراحی نموده‌اند که برای رویارویی با وابستگی ضرایب هارمونیک کروی تعبیه شده‌اند. فیلترهای دیگری هم وجود دارند که با استفاده از ویولت‌های کروی[1] برای کاهش خطاهای موجود می‌پردازند و استفاده از آن به ویژه در مناطق با مقیاس کوچک‌تر توصیه می‌شود [21]. اما دسته دوم که به فیلترهای تصادفی[2] و یا فیلترهای بهینه مشهور می‌باشند و با داشتن یکسری اطلاعات اضافی مانند استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی، میزان خطای موجود در سیگنال را مد نظر قرار داده، تا اینکه بهترین تصمیم در مورد اینکه چه چیز سیگنال و چه چیز نویز باشد، صورت گیرد [22]. از جمله فیلترهای دسته دوم می‌توان به کارهایی همچون [23]، [24] و [22] اشاره نمود.

۱-۲- اهداف موضوع تحقیق پایان نامه

هدف پایان‌نامه شناسایی داده‌ها یا ضرایب هارمونیک پتانسیلی و تفکیکی ماهیانه ماهواره‌های GRACE از نقطه نظر توانایی و دقت داده‌ها در تعیین تغییرات زمانی میدان ثقل زمین می‌باشد. برای این

[1] Spherical wavelet
[2] Stochastic

کار لازم است که خطاهای موجود در داده‌ها شناسایی شده و اثر آن‌ها از روی داده‌ها حذف گردد. این خطاها دارای وابستگی‌های مکانی و زمانی می‌باشند که برای تشخیص آن‌ها در این پایان‌نامه فیلترهای میانگین ساده، میانگین وزن‌دار و فیلتر وینر به کار می‌روند. محاسبه پارامترهای جاذبی متغیر در زمان با استفاده از ضرایب هارمونیک کروی جاذبی حاصل از GRACE تا هر درجه و مرتبه‌ای منجر به تولید یک مقدار در یک نقطه[1] نمی‌شود بلکه یک مقدار میانگین در آن نقطه[2] می‌گردد. برای رسیدن به مقدار نقطه‌ای با استفاده از داده‌های GRACE بایستی که بسط را تا بی‌نهایت ادامه داد. در حالی که مجموع ترم‌های تا درجه ۱۲۰ فاقد تغییرات از درجه بالاتر از ۱۲۰ بوده و بنابراین به عنوان یک مقدار میانگین محسوب می‌شود. برای نتیجه‌گیری صحیح مقادیر میانگین، تعیین وابستگی‌های مکانی و زمانی داده‌ها ضروری است. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان اهداف اصلی این تحقیق را در دو قسمت زیر خلاصه نمود:

۱- طراحی و اعمال یک فیلتر بهینه به نام وینر از نوع تصادفی بر روی داده‌های ماهیانه جاذبی GRACE

۲- مقایسه کارایی فیلتر بهینه وینر در مقایسه با فیلترهای کامل و گوسین

۱-۳- ساختار کلی پایان‌نامه

با توجه به موارد مطرح شده و جهت رسیدن به اهداف مذکور، ساختار کلی پایان‌نامه به صورت زیر درنظر گرفته شده است:

فصل دوم با توضیحاتی کلی در مورد مشخصات فنی ماهواره‌های GRACE آغاز شده و با تعریف میدان جاذبه زمین به همراه پتانسیل جاذبی زمینی و ماهواره‌ای آن ادامه می‌یابد. در طی این فصل، با معادلات کلی مربوط به پتانسیل اغتشاش بر حسب المان‌های کپلری و آنالیز اغتشاشات مدار ماهواره و

[1] Point value
[2] Mean value