نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۸

Vol.7, No.1, Spring 2019

۲۱۱-۲۲٤

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی جزر و مد با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی مشاهدات بویه

سعید فرزانه[1*] ،محمد علی شریفی[1]، کمال پروازی[2] ، بهاره نمازی[3]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۰

چکیده

مشاهدات جزرومدی که از طریق ایستگاه‌های تایدگیج ساحلی به‌دست می‌آیند از دقت بالایی برخوردار می-باشند. اما نصب این ایستگاه‌ها دارای محدودیت مکانی می‌باشد. برای رفع این نقیصه می‌توان از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای استفاده کرد. اما در مقابل مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای از نرخ نمونه برداری پایینی برخوردار می‌باشند. با توجه به محدودیت نصب ایستگاه¬های تایدگیج و محدودیت فاصله نمونه‌برداری برای مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای، نیازمند مشاهدات و اطلاعاتی هستیم که بتواند این دو مشکل را مرتفع نماید. مشاهدات بویه علاوه بر دقت مناسب و فاصله نمونه برداری بالا این امکان را نیز فراهم می‌آورند که در بسیاری از مناطق دور از ساحل اندازه‌گیری و ثبت مشاهدات سطح آب دریاها را داشته باشیم .در این تحقیق به تجزیه و تحلیل مشاهدات بویه از طریق برآورد هارمونیک کمترین مربعات پرداخته شده است. به این صورت که با استفاده از این روش امکان استخراج فرکانس‌های مهم و معنی دار موجود در این داده‌ها میسر شده است. اهمیت این فرایند در مدلسازی جزرومد و پیش‌بینی جزرومد می‌باشد. اساس مدلسازی جزرومد و پیش‌بینی آن بر مبنای فرکانسی است که از خود مشاهدات استخراج شده است. در این تحقیق از مشاهدات مربوط به سری‌های زمانی ۵۷ ایستگاه بویه در طول سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. لیستی از فرکانس‌های مهم استخراجی ارائه شده است. در ادامه با استفاده از این لیست فرکانسی ارائه شده به مقایسه پیش‌بینی جزرومد حاصل از مشاهدات بویه با مشاهدات تایدگیج ساحلی پرداخته شد. پیش‌بینی جزر و مد به مدت یک ماه برای تمام ایستگاه‌ها با استفاده از، فرکانس‌های مهم استخراجی حاصل از این تحقیق انجام گرفت. میانگین *RMSE* داده‌های پیش‌بینی شده در بین ایستگاه‌های بویه در حدود ۶ سانتیمتر بوده است. در نهایت برای بررسی صحت داده‌های بویه، مقایسه‌ای بین این داده‌ها با داده‌های تایدگیج انجام گرفت. که نشان دهنده اختلافی در حدود ۹ سانتیمتر در پیش‌بینی مشاهدات سطح آب بوده است..

کلیدواژه‌ها: سری زمانی ایستگاه‌های بویه، برآورد هارمونیک کمترین مربعات(*LS-HE*) ، فرکانس‌های جزر و مد، پیش‌بینی جزر و مد

*نویسنده مکاتبه کننده:

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۱۷۱۵۷

Email : farzaneh@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

۱- مقدمه

پدیده جزرو مد از دیرباز برای ساکنین مناطق ساحلی به عنوان یک پدیده تناوبی که موجب تغییر خط ساحلی می‌گردد مورد مشاهده قرار گرفته است. اقیانوس شناس‌ها برای رسیدن به درک بهتر از خواص فیزیکی دریا به‌منظور پیش بینی و نظارت بر حرکت‌های سواحل دریاها جزرومد را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. تلاش در مدلسازی جزرومد سابقه طولانی داشته و به عنوان یکی از اقدامات اولیه در این خصوص می‌توان به لاپلاس و تئوری دینامیکی او بر مبنای معادلات دیفرانسیل (LTE[1]) در جهت مدلسازی جزرومد در سطح اقیانوس‌ها اشاره نمود. از آن‌جایی که پدیده جزر و مد یک پدیده پریودیک محسوب می‌شود، یکی از عوامل مهم در شناخت ساختار داده‌های جزر و مدی، فرکانس‌های تشکیل دهنده این داده‌ها می‌باشند[۱].

در اکثر مطالعات پیشین برای تعیین فرکانس‌های جزرومدی از مشاهدات جزرومدی استفاده نشده و روش‌های مورد استفاده بر مبنای اصول تئوری بوده است. در این روش‌ها پتانسیل جزرومد با استفاده از افمریس‌های ماه، خورشید و سایر سیارات مقدار دهی شده و فرکانس‌های جزرومدی از این طریق محاسبه می‌شوند[۲ و ۳]. تبدیلات ریاضی مختلفی برای آنالیز سری‌های زمانی وجود دارد. در این مورد می‌توان به آنالیز موجک اشاره کرد. فلینچم و جی روش تبدیل موجک پیوسته را ارائه کردند[۴]. آنالیز فوریه نیز روش دیگری است که برای سیگنال‌های ایستا به عنوان یک آنالیز ایده‌آل ارائه شده است. هارتمن-ونزل با استفاده از تبدیل فوریه سریع[2]، بسط هارمونیک پتانسیل جزر و مد را ارائه کردند[۵]. دوکارم و همکاران از روشی بر پایه برآورد بیشترین درستنمایی استفاده کرده‌اند[۵].

روشAIC توسط ساکاموتو و همکارانش برای پیدا کردن مولفه‌های غیر جزرومدی با استفاده از برنامه VAV ارائه شده است[۷]. هم چنین کاپوانو و همکاران از روش ICA برای به‌دست آوردن اجزای جزرومدی مستقل و غیر خطی استفاده کرده‌اند[۸].

روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات (LS-HE[3]) به منظور آنالیز طیفی و تشخیص فرکانس‌های موجود در سیگنال‌هایی با ماهیت پریودیک مورد استفاده قرار گرفته است. این روش نسبت به تبدیل فوریه دارای مزیت عدم نیاز به داده‌های هم فاصله می‌باشد. ازآنجایی که ماهیت داده‌های جزر و مدی را می‌توان در قالب فرکانس‌های تشکیل دهنده آن‌ها بیان نمود و با استفاده از یک روش مشاهده مبنا، فرکانس‌های جزرومدی را استخراج کرد. برای این منظور ار آنالیز هارمونیک داده‌های سطح دریا از طریق بسط به سری فوریه استفاده می‌شود. آنالیز هارمونیک، روشی بسیار مفید برای آنالیز و تجزیه تحلیل اطلاعات جزرومدی می‌باشد. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به استخراج فرکانس‌های جزرومدی برای مشاهدات تاید-گیج‌های کشور انگستان توسط امیری سیمکویی و همکاران اشاره کرد. موسویان و مشهدی حسینعلی از آنالیز تک تغیره برای استخراج فرکانس‌های جزر و مدی استفاده کردند[۹]. از جمله مزایای روش هارمونیک کمترین مربعات نسبت به روش ماکزیمم درستنمایی می‌توان به ساده و قابل فهم بودن این روش، عدم نیاز به مشتق گیری، محاسبه مولفه‌های کوواریانس و سرعت بالا جهت همگرا شدن اشاره کرد.

از جمله کاربردهای دیگر روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات می‌توان به استفاده از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات جهت آنالیز سری‌های زمانی TEC، کاهش اثر خطای چندمسیری مشاهدات GPS با استفاده از روش‌های برآورد هارمونیک کمترین

[1] Laplace Tidal Equations
[2] Fast Fourier Transformation
[3] least-squares harmonic estimation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

مربعات، استفاده از روش هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره در سری‌های زمانی GPS به‌منظور استخراج پریود دراکونیک موجود در این داده‌ها اشاره کرد[۱۵، ۱۶ و ۱۸].

مشاهدات جزرومدی که از طریق ایستگاه‌های تایدگیج ساحلی به‌دست می‌آیند با توجه به اینکه نرخ نمونه‌برداری بالایی دارند(معمولا به‌صورت ۱۵ دقیقه یکبار مشاهده ثبت می‌شود) از دقت بالایی برخوردار می‌باشند. اما نصب این ایستگاه‌ها دارای محدودیت مکانی می‌باشند به این‌صورت که نمی‌توان هر منطقه‌ای از دریا را برای نصب ایستگاه تایدگیج در نظر گرفت. برای رفع این نقیصه از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای استفاده می‌شود. به این صورت که سری زمانی مربوط به این مشاهدات به‌عنوان یک شبه-تایدگیج در نظر گرفته می‌شود. اما در مقابل مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای از نرخ نمونه برداری پایینی(دارای پریود نمونه‌برداری ۹/۹۱۵روز می‌باشند) برخوردار می‌باشند. با توجه به محدودیت نصب ایستگاه‌های تایدگیج و محدودیت فاصله نمونه‌برداری برای مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، نیازمند مشاهدات و اطلاعاتی هستیم که هم بتواند از فاصله نمونه‌برداری بالایی برخوردار باشد هم بتواند تا حدود زیادی محدودیت مربوط به نصب ایستگاه‌های تایدگیج را مرتفع نماید.

مشاهدات بویه علاوه بر دقت مناسب و فاصله نمونه‌برداری بالا این امکان را نیز فراهم می‌آورند که بتوان در بسیاری از مناطق دور از ساحل اندازه‌گیری و ثبت مشاهدات سطح آب دریاها را داشته باشیم. بویه پس از اندازه‌گیری و ثبت مشخصات امواج و پارامترها، داده‌ها را بوسیله سیستم ارتباط از راه دور به ایستگاه مرجع منتقل کرده و این داده ها ثبت و ذخیره می‌شوند. با توجه به اهمیت این مشاهدات(فاصله نمونه برداری بالا و امکان اندازه‌گیری در نقاط در نقاط دور از ساحل)، در این تحقیق به آنالیز و تجزیه و تحلیل مشاهدات بویه از طریق برآورد هارمونیک کمترین مربعات پرداخته شده است. به این صورت که با استفاده از این روش امکان استخراج فرکانس‌های مهم و معنی دار موجود در این داده‌ها میسر شده است. اهمیت این فرایند در مدلسازی جزرومد و پیش‌بینی جزرومد می‌باشد. اساس مدلسازی جزرومد و پیش‌بینی آن بر مبنای فرکانسی است که از خود مشاهدات استخراج شده است. در این تحقیق از مشاهدات مربوط به سری‌های زمانی ۵۷ ایستگاه بویه در طول سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. و لیستی از فرکانس‌های مهم استخراجی ارائه شده است. در ادامه با استفاده از این لیست فرکانسی ارائه شده به مقایسه دامنه مولفه‌های مهم جزرومدی حاصل از مشاهدات بویه با مشاهدات تایدگیج ساحلی پرداخته شده است. در نهایت از این لیست فرکانسی در جهت پیش‌بینی جزر و مد با استفاده از مشاهدات سری زمانی بویه استفاده شده است.

۲- کشف مشاهدات اشتباه در سری های زمانی

یکی از مراحل مهم در آنالیز سری‌های زمانی، کشف مشاهدات اشتباهات می‌باشد. به‌گونه‌ای که این مشاهدات نسبت به مابقی مشاهدات موجود در مجموعه داده‌ها، ناسازگار می‌باشند. مشاهدات اشتباه در داده‌ها، منجر به بروز خطا در مدل، پیش بینی نادرست و نتایج نادرست خواهد شد. روش‌های متعددی برای بررسی اشتباهات وجود دارد که در اینجا با توجه به نوع داده‌ها از روش آستانه گذاری استفاده خواهد شد. این روش، یک راه حل استاندارد برای کشف مشاهدات اشتباهات می‌باشد. برای این کار از یک حدآستانه ماکزیمم استفاده می‌شود[۱۰]. این حدآستانه، معمولاً با ویژگی‌های خود داده‌ها، در ارتباط است. روش آستانه‌گذاری برای مشاهدات، یک توزیع معلوم در نظر می‌گیرد که این توزیع معمولاً، توزیع نرمال می‌باشد. بنابراین، اگر یک مجموعه داده به‌صورت $y_i=\{y_1,y_2,...,y_n\}$ داشته باشیم، آنگاه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

روش آستانه‌گذاری با فرض توزیع نرمال $N(\mu,\sigma^2)$ برای داده‌ها، به‌صورت زیر قابل تعریف است[۱ و ۲].

رابطه (۱)

$$out(\alpha,\mu,\sigma)=\left\{i=1,2,...,n:|y_i-\mu|>z_{1-\alpha/2}\sigma\right\}$$

که در آن

$out(\alpha,\mu,\sigma)$ محدوده اشتباهات، μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار (مجهول) داده‌ها، $z_{1-\alpha/2}$ مقدار بحرانی متناسب با سطح معنی‌دار $1-\alpha/2$ و مربوط به توزیع نرمال استاندارد، می‌باشند.

رابطه (۲)

$$out(\alpha,\bar{y}_m,s_m,m)=\left\{i=1,2,...,m:\left|y_i-\bar{y}_m\right|>z_{1-\alpha/2}s_m\right\}$$

که در آن

$out(\alpha,\bar{y}_m,s_m,m)$ محدوده اشتباهات، $y_i=\{y_1,y_2,...,y_m\}$ مشاهدات بردار $y\in R^n$، $\bar{y}_m$ و s_m به ترتیب برآوردهایی از میانگین و انحراف معیار m داده مذکور می‌باشند.

اگر $y_i\in out(\alpha,\bar{y}_m,s_m,m)$، آنگاه y_i به‌عنوان مشاهده اشتباه شناخته می‌شود. بعد از اعمال روش آستانه‌گذاری برای این مجموعه کوچک از داده‌ها، پنجره مذکور به اندازه یک مشاهده به سمت جلو حرکت کرده و محاسبات برای مجموعه جدید یعنی، $y_i=\{y_2,y_3,...,y_{m+1}\}$ تکرار می‌شود. حرکت این پنجره و انجام محاسبات، تا پایان مجموعه داده‌ها ادامه می‌یابد. حسن این روش، بار محاسباتی کم است.

۳- مبانی برآورد هارمونیک کمترین مربعات

روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات (LS-HE) به‌منظور تعیین فرکانس‌های موجود در ساختار مشاهدات جزرومد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع این روش، یک سری الگوهای پریودیک را در قالب توابع هارمونیک معرفی کرده و از این طریق، سبب بهبود مدل تابعی می‌گردد.

در واقع، این روش، متناسب با مقدار α، مشاهداتی را که از توزیع $N(\mu,\sigma^2)$ انحراف دارند، به‌عنوان مشاهده اشتباه شناسایی می‌کند. لازم به ذکر است که تعریف (۱) نه فقط برای توزیع نرمال که برای هر توزیع متقارن دیگری با تابع چگالی مثبت، قابل تعمیم است [۱۳]. همچنین، در این رابطه می‌توان به جای استفاده از میانگین، از میانه و یا هر مقدار پایدار دیگری استفاده نمود[۱۴].

اگر این محاسبات برای قسمت کوچکتری از داده‌ها محدود، در پنجره‌ای با بعد m بازنویسی شود، آنگاه محدوده اشتباهات برای آن‌ها عبارتست از:

۳-۱- برآورد هارمونیک کمترین مربعات تک متغیره

برای یک سری زمانی، ساده ترین رفتار پریودیکی که می‌توان به منظور بهبود مدل تابعی، به آن اضافه نمود، عبارت است از[۱۵]:

رابطه (۳)

$$y(t)=a_k\cos\omega_k t+b_k\sin\omega_k t$$

این رابطه بیانگر یک موج سینوسی با یک فاز اولیه می‌باشد که در آن ضرایب a_k و b_k و فرکانس ω_k اعداد حقیقی می‌باشند. بنابراین، مدل تابعی به‌صورت زیر قابل بسط است:

رابطه (۴)

$$E(\underline{y})=Ax+A_k x_k$$

هم چنین داریم :

رابطه (۵)

$$A_k=\begin{bmatrix}\cos\omega_k t_1 & \sin\omega_k t_1\\ \cos\omega_k t_2 & \sin\omega_k t_2\\ \vdots & \vdots\\ \cos\omega_k t_m & \sin\omega_k t_m\end{bmatrix},\qquad x_k=\begin{bmatrix}a_k\\ b_k\end{bmatrix}$$

که ماتریس A شامل دو ستون مربوط به فرکانس ω_k تابع سینوسی بوده و بردار x، شامل ضرایب a_k و b_k می‌باشد. برای تعیین فرکانس مجهول ω_k، با استفاده از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

فرض‌های صفر H_0 و مخالف H_a نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شوند :

رابطه (۶)

$$H_0: E(\underline{y}) = Ax$$
$$H_a: E(\underline{y}) = Ax + A_k x_k$$

در واقع علت در نظر گرفتن این دو فرض این است که، اثرات متناوب تحت فرض صفر غایب هستند، در حالی که تحت فرض مقابل حضور دارند. هدف ما یافتن فرکانس‌هایی است که بتوان به ازای این فرکانس‌ها ماکزیمم طیف توانی را به‌دست آورد.

رابطه (۷)

$$\underline{\omega}_k = \underset{\omega_j}{\operatorname{argmax}}\, P(\underline{\omega}_j)$$

که در آن

رابطه (۸)

$$P(\underline{\omega}_j) = \underline{\hat{e}}_0^T Q_y^{-1} A_j (A_j^T Q_y^{-1} P_A^{\perp} A_j)^{-1} A_j^T Q_y^{-1} \underline{\hat{e}}_0$$

در رابطه (۸) $\underline{\hat{e}}_0 = P_A^{\perp}\underline{y}$ بردار باقیمانده‌های کمترین مربعات و $P_A^{\perp} = I - A(A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1}$ تصویرگر قائم است و هردو تحت فرض صفر H_0 به‌دست می‌آیند[۱۵].

در رابطه (۸) به ازای $\underline{\omega}_j$ های مختلف، ماتریس‌های A_j مختلفی مورد آزمایش قرار می گیرند تا مقدار $P(\underline{\omega}_j)$ ماکزیمم، یافت شود.ماتریس A_j که مقدار بیشینه $P(\underline{\omega}_j)$، به ازای آن به‌دست می‌آید، به‌عنوان ماتریس A_k انتخاب می شود.

استفاده از روش تحلیلی برای تعیین ماتریس A_j که مقدار بیشینه $P(\underline{\omega}_j)$، به ازای آن به‌دست می‌آید، به علت وجود مقادیر بیشینه‌ی محلی، طاقت فرسا و پیچیده است. راه حل مناسب‌تر، استفاده از روش‌های عددی برای حل مسئله است. به این منظور، می‌توان یک رابطه گسسته بین $\underline{\omega}_j$ و $P(\underline{\omega}_j)$ برقرار کرد و نمودار مقادیر طیفی $P(\underline{\omega}_j)$ را برحسب مقادیر گسسته $\underline{\omega}_j$ به‌دست آورد و در نهایت $\underline{\omega}_j$ ای که مقدار طیفی $P(\underline{\omega}_j)$ بیشینه را دارا می‌باشد، به‌عنوان فرکانس مدنظر انتخاب نمود.

انتخاب $\underline{\omega}_j$ های مختلف از طریق رابطه زیر صورت می‌گیرد:

رابطه (۹)

$$T_{j+1} = T_j(1+\alpha T_j/T), \quad \alpha = 0.1, \quad j = 1,2,...$$
$$\underline{\omega}_j = 2\pi/T_j$$

که در آن، T_1، پریود نایکویست بوده و T، طول کل سری زمانی است. اگر بیشترین فرکانس موجود در سیگنال v باشد فرکانس نمونه برداری f=2v یا بزرگتر می‌باشد. f را فرکانس نایکوییست می‌نامند. مقدار T_1 در رابطه (۹)، معادل با ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است.

۳-۲- برآورد هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره

اگر در یک مدل خطی به جای یک سری زمانی، r سری زمانی با ماتریس طرح A و ماتریس کوریانس Q_y یکسان وجود داشته باشند، آنگاه مدل خطی مذکور به حالت چندمتغیره تعمیم می‌یابد. برای یک مدل خطی چند متغیره رابطه (۴) به رابطه زیر تعمیم می‌یابد[۱۶]:

رابطه (۱۰)

$$E(\mathrm{vec}(\underline{Y})) = (I_r \otimes A)\,\mathrm{vec}(X) + (I_r \otimes A_k)\,\mathrm{vec}(X_k),\quad D(\mathrm{vec}(\underline{Y})) = \Sigma \otimes Q$$

که در آن

vec و $\otimes$ به ترتیب، عملگر وک و ضرب کرانوکر، $\underline{Y}=[\underline{y}_1\ \underline{y}_2 \dots \underline{y}_r]$ ماتریس با بعد $m\times r$، $X=[x_1\ x_2 \dots x_r]$ و X_k [= $_1 x_k$ ‡k ماتریس‌های شامل بردار مجهولات، به ترتیب با بعد $n\times r$ و $2\times r$ می‌باشند.

اجزای ماتریس Σ با بعد $r\times r$ و مجهولات متعلق به ماتریس Q با بعد $m\times m$، از طریق یک آنالیز چندمتغیره قابل حصول می‌باشند. با یک نگاه کوتاه به رابطه (۱۰)، می‌توان دریافت که عبارت $I_r \otimes A_k$ نشان دهنده وجود یک فرکانس مشترک در همه سری‌های زمانی است که بایستی با استفاده از

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

برآورد هارمونیک چندمتغیره یافت شود. رابطه طیف توانی در حالت چندمتغیره، به‌صورت زیر قابل بازنویسی است[۱۵]:

رابطه (۱۱)

$$P(\underline{\omega}_j)=tr(\underline{\hat{E}}^T Q^{-1} A_j (A_j^T Q^{-1} P_A^{\perp} A_j)^{-1} A_j^T Q^{-1} \underline{\hat{E}} \Sigma^{-1})$$

$\underline{\hat{E}}=P_A^{\perp}\underline{Y}$، به عنوان باقیمانده‌های کمترین مربعات r سری زمانی و $P_A^{\perp}=I\text{-}A(A^TQ^{-1}A)^{-1}A^TQ^{-1}$ به‌عنوان تصویرگر قائم مدل تک متغیره در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۱۱)، همه سری‌های زمانی را به‌طور همزمان در نظر گرفته و از طریق ماتریس‌های Σ و Q به ترتیب، کراس کرولیشن و وابستگی زمانی را به حساب می‌آورد. مقدار ماتریس Σ، از طریق رابطه (۱۲)، قابل برآورد است:

$$\hat{\underline{\Sigma}}=\frac{\hat{\underline{E}}^T Q^{-1} \hat{\underline{E}}}{m-n}$$

رابطه (۱۲)

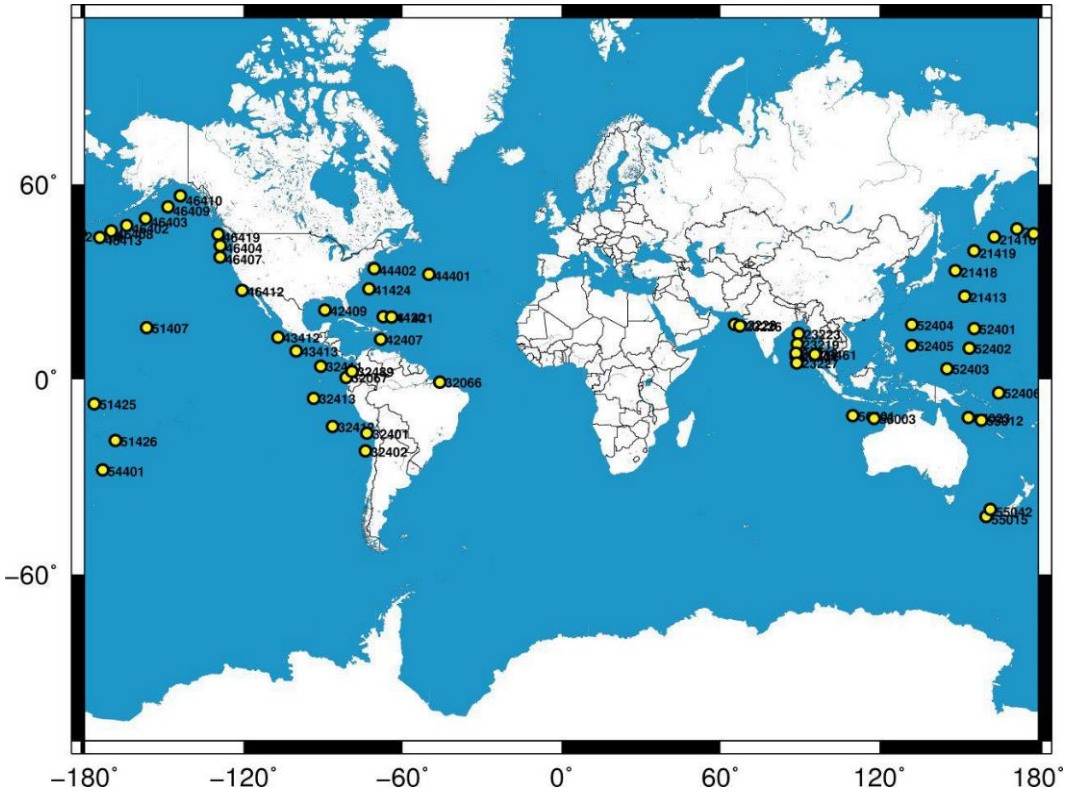
در ادامه برای شناسایی بهتر سیگنال‌ها، نحوه انجام آنالیز هارمونیک کمترین مربعات به دو صورت تک متغیره، برای تک تک مولفه‌های مختصات هر یک از ایستگاه‌ها و چند متغیره، برای زمانی که چند سری زمانی همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند، بیان شده و در نهایت نتایج عددی به‌صورت نمودارهایی از مقادیر طیفی $P(\underline{\omega}_j)$ برای مجموعه‌ای از $\underline{\omega}_j$ به منظور نشان دادن سهم فرکانس‌های مختلف در بازسازی سری‌های زمانی ارائه شده است.

۴- نتایج عددی

در این تحقیق ار داده‌های ۵۷ ایستگاه بویه استفاده شده است. داده‌ها با نرخ برداشت ۱۵ دقیقه در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ انتخاب شده‌اند. پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMIT انجام گرفته است. در نهایت خروجی ارتفاعی به‌صورت، سری زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. نرخ برداشت داده‌ها به‌صورت ۱ ثانیه‌ای بوده است. با توجه به اینکه داده‌های ایستگاه‌های سرویس بین المللی GPS به‌صورت ۳۰ ثانیه‌ای می‌باشد. داده‌های حاصل از سری زمانی بویه به‌صورت ۳۰ ثانیه‌ای مورد نمونه‌برداری قرار گرفته‌اند. اثرات بارگذاری و جابجایی پوسته ناشی از جزر و مد اقیانوسی، با استفاده از این نرم‌افزار مدلسازی شده است. مدل مورد استفاده در آن مدل IERS03 می‌باشد. نتایج به‌صورت استاتیک و استاتیک سریع مورد پردازش قرار گرفته است. دقت به‌دست آمده برای مولفه‌ی ارتفاعی ۰/۵ تا ۰/۵۵ سانتیمتر می‌باشد. به‌همین دلیل می‌توان از مشاهدات بویه برای آنالیز سطح متوسط آب دریاها استفاده کرد[۱۷]. موقعیت و مختصات این ایستگاه‌ها در شکل (۱) ارائه شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]



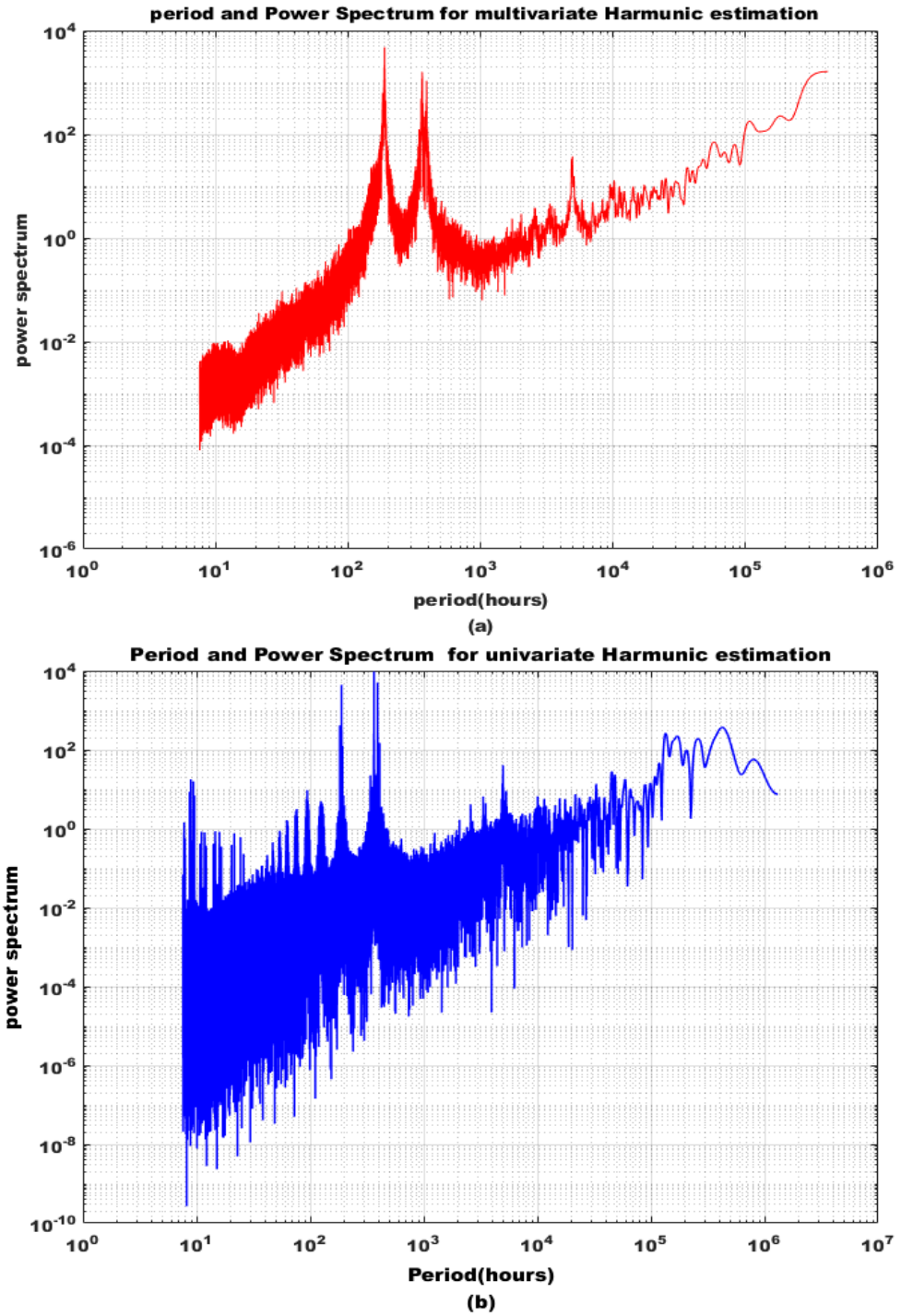
شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های بویه استفاده شده در این تحقیق

۴-۱- آنالیز طیفی داده‌های جزرو مدی

در ابتدا، آنالیز چندمتغیره و تک متغیره، از طریق بررسی طیف توانی داده‌های جزر و مدی در هر دو حالت، با یکدیگر مقایسه می‌گردند. سپس، با استفاده از آنالیز چندمتغیره به استخراج فرکانس‌های جزر و مدی پرداخته می‌شود. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، سری‌های زمانی هم‌فاصله از داده‌های جزر و مدی ۵۷ ایستگاه بویه می‌باشند.

با استفاده از رابطه (۹) مقادیر گسسته $\underline{\omega}_j$ محاسبه می‌شود. در این رابطه با توجه به اینکه نیاز به محاسبه طیف توانی می‌باشد، مقدار T_1 معادل با ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. سپس به محاسبه طیف توانی سری‌های زمانی پرداخته شده است. به این صورت که یکبار با استفاده از رابطه (۱۱) برای ۵۷ سری زمانی به عنوان سری زمانی چندمتغیره و یکبار با استفاده از رابطه (۸) برای یکی از ۵۷ سری زمانی به عنوان سری زمانی تک متغیره محاسبه گردیده است. به این ترتیب طیف توانی در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت، حالت اول با استفاده از آنالیز هارمونیک چند متغیره، به این صورت که همزمان مشاهدات مربوط به چند ایستگاه با هم مورد پردازش قرار گرفت است. حالت دوم استفاده از آنالیز هارمونیک تک متغیره، به این صورت که مشاهدات سری‌زمانی مربوط به هر ایستگاه به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی‌ها در شکل (۲) ارائه شده است. تفاوت طیف‌های توانی محاسبه شده در این دو شکل، در توان فرکانس‌های مورد بررسی می‌باشد. در حقیقت، با استفاده از آنالیز هارمونیک چندمتغیره توان طیفی فرکانس‌هایی که بین سری‌های زمانی مشترک بوده است، بیشتر از حالت تک متغیره بوده و راحت‌تر قابل کشف می‌باشند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]



شکل ۲: طیف توانی چندمتغیره کمترین مربعات اخذ شده از ۵۷ ایستگاه بویه با نرخ برداشت ۱۵ دقیقه (شکل a). طیف توانی تک متغیره کمترین مربعات اخذ شده از ایستگاه بویه کامچاتکا با نرخ برداشت ۱۵ دقیقه (شکل b)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

در ادامه، فرکانس‌هایی که از توان طیفی بالاتری برخوردار بوده‌اند، استخراج گردیده‌اند. در جدول (۲)، لیستی از فرکانس‌های مهم استخراج شده با استفاده از آنالیز طیفی چندمتغیره داده‌های جزرومدی ایستگاه‌های بویه ارائه شد.

جدول ۲: فرکانس‌های جزرومدی استخراج شده از آنالیز طیفی چندمتغیره داده‌های جزرومدی ایستگاه‌های بویه

شماره	فرکانس(دور در ساعت)	شماره	فرکانس(دور در ساعت)	شماره	فرکانس(دور در ساعت)
1	0.2458664158	50	0.0812196884	99	0.0419644295
2	0.2441231120	51	0.0806534343	100	0.0418773167
3	0.2429805211	52	0.0805395142	101	0.0417935544
4	0.2415328929	53	0.0804993054	102	0.0416997408
5	0.2397236328	54	0.0804121901	103	0.0416461310
6	0.2055028704	55	0.0802513601	104	0.0415690708
7	0.2041134285	56	0.0800938818	105	0.0414618575
8	0.2024738318	57	0.0799464546	106	0.0413378899
9	0.2008319875	58	0.0798392347	107	0.0410061922
10	0.1996793501	59	0.0797018584	108	0.0406610895
11	0.1984060849	60	0.0795644846	109	0.0406610895
12	0.1633946688	61	0.0794539134	110	0.0388216782
13	0.1619203662	62	0.0792830328	111	0.0388216782
14	0.1610230242	63	0.0791456575	112	0.0387312162
15	0.1595115078	64	0.0790518398	113	0.0386508061
16	0.1247345375	65	0.0789546715	114	0.0373675790
17	0.1233138520	66	0.0788910105	115	0.0371095937
18	0.1223689645	67	0.0787871404	116	0.0365768707
19	0.1220630717	68	0.0786263110	117	0.0363356397
20	0.1206735294	69	0.0786263110	118	0.0361279111
21	0.1192193426	70	0.0785056888	119	0.0356957036
22	0.1026307230	71	0.0782577442	120	0.0348848992
23	0.1001440648	72	0.0782543931	121	0.0348848992
24	0.0983682238	73	0.0778690736	122	0.0343052731
25	0.0956776570	74	0.0777819573	123	0.0332130357
26	0.0934930407	75	0.0777819573	124	0.0195269712
27	0.0848517641	76	0.0777149453	125	0.0192422059
28	0.0847177381	77	0.0776311789	126	0.0186090254
29	0.0842855084	78	0.0775842706	127	0.0186090254
30	0.0838700311	79	0.0774066887	128	0.0074909103
31	0.0836153831	80	0.0772525603	129	0.0059503333
32	0.0835316173	81	0.0770981009	130	0.0030809389
33	0.0834143453	82	0.0766259963	131	0.0030809389
34	0.0833741383	83	0.0764048555	132	0.0026090389
35	0.0833104763	84	0.0762581509	133	0.0014917575
36	0.0832434637	85	0.0760898977	134	0.0009871746
37	0.0831965549	86	0.0759692759	135	0.0008836716
38	0.0831261928	87	0.0759290692	136	0.0007501889
39	0.0829955183	88	0.0758419534	137	0.0006101478
40	0.0829318569	89	0.0758419534	138	0.0006068153
41	0.0826403527	90	0.0755269960	139	0.0004170744
42	0.0826403527	91	0.0755269960	140	0.0003174619

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

شماره	فرکانس(دور در ساعت)	شماره	فرکانس(دور در ساعت)	شماره	فرکانس(دور در ساعت)
43	0.0824292624	92	0.0754298277	141	0.0002644584
44	0.0820942002	93	0.0750780146	142	0.0002281591
45	0.0820472929	94	0.0741599480	143	0.0001852246
46	0.0819869808	95	0.0445275602	144	0.0001458093
47	0.0818663586	96	0.0442729219	145	0.0001425338
48	0.0818228010	97	0.0442729219	146	0.0001140741
49	0.0816452172	98	0.0421319538		

در ادامه برای بررسی دقت مشاهدات ایستگاه‌های بویه به پیش‌بینی جزرومد در یک بازه زمانی یک ماهه پرداخته شده است. نتایج مربوط به پیش‌بینی جزر و مد در شش ایستگاه بویه و شش ایستگاه تایدگیج برای بازه زمانی یک ماهه به‌طور مجزا در جداول (۳ و ۴)، ارائه شده است. در این جداول ماکزیمم، مینیمم و میانگین مربوط به بردار باقیمانده داده‌های پیش‌بینی شده با هم مقایسه و نتایج ارائه شده است.

جدول ۳: RMSE بردار باقیمانده‌ها در هر یک از ایستگاه‌های بویه و تایدگیج برای یک ماه پیش‌بینی جزرومد

Station	Tide1	Tide2	Tide3	Tide4	Tide5	Tide6
RMSE(m)	0.162	0.144	0.118	0.152	0.093	0.201
Station	Buoy1	Buoy2	Buoy3	Buoy4	Buoy5	Buoy6
RMSE(m)	0.091	0.103	0.066	0.041	0.042	0.030

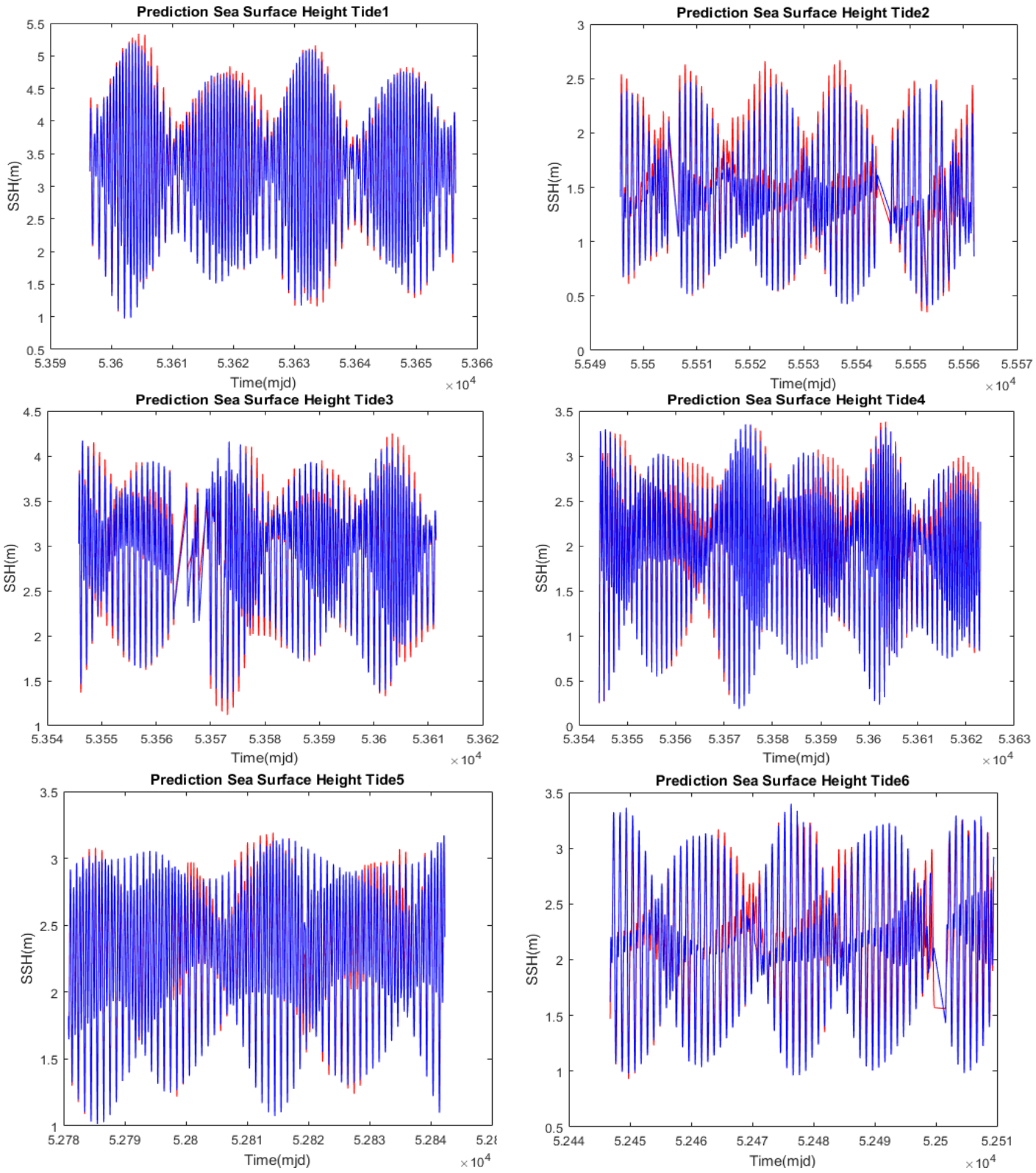
جدول ۴: ماکزیمم، مینیمم و میانگین بردار باقیمانده‌ها در هر یک از ایستگاه‌های بویه و تایدگیج برای یک ماه پیش‌بینی جزرومد

Station	Tide	Buoy
Maximum(m)	0.201	0.103
Minimum(m)	0.093	0.030
Average(m)	0.145	0.062

در شکل (۳ و ۴) نمودار مربوط به پیش‌بینی در بازه زمانی یک ماهه برای ایستگاه‌های تایدگیج و بویه ارائه شده است. در این اشکال نمودار قرمز رنگ مربوط به داده‌های معلوم و نمودار سبز و آبی رنگ مربوط به داده‌های پیش‌بینی شده می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

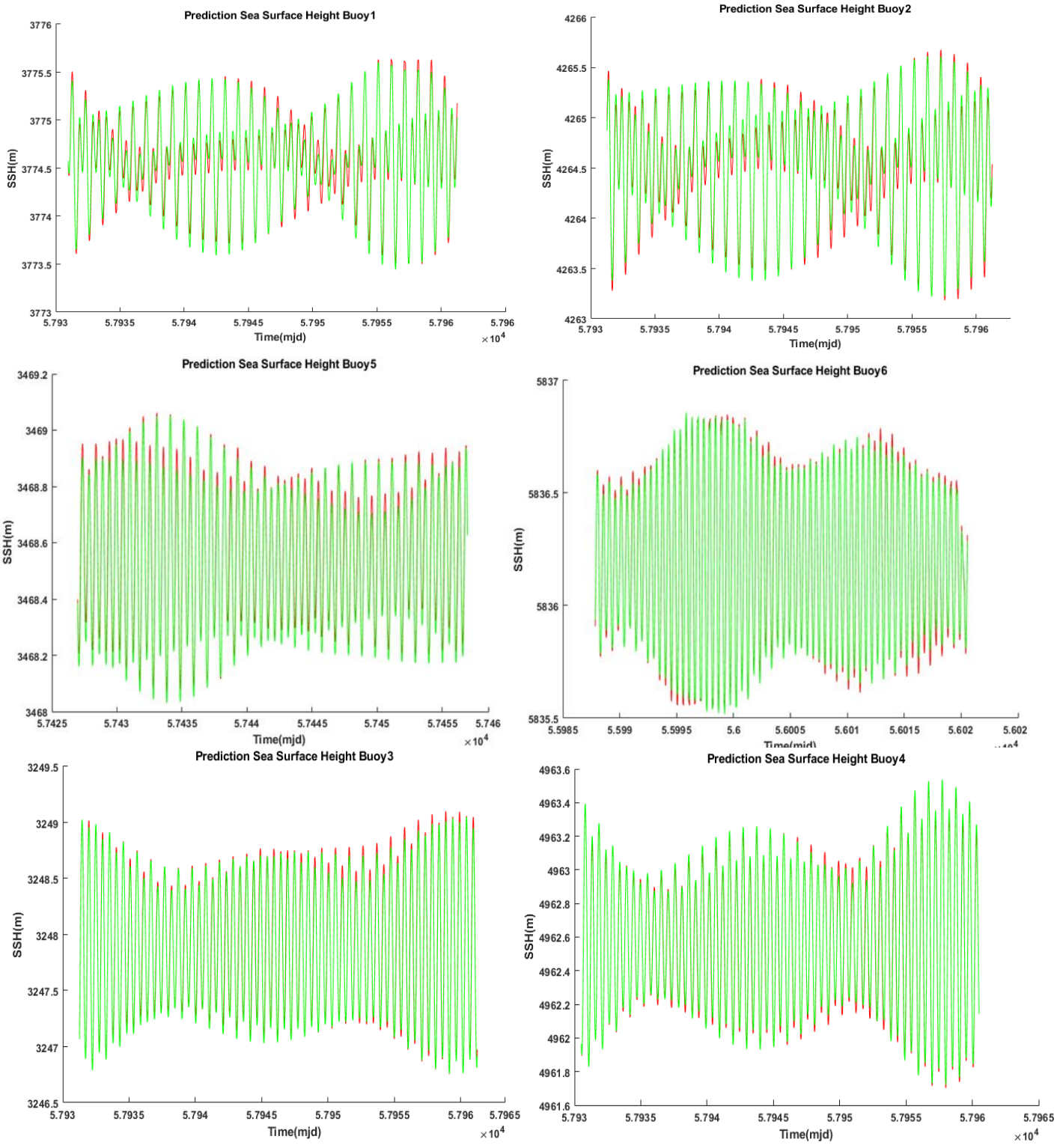
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]



شکل ۴: مقایسه بین داده‌های معلوم و داده‌های پیش بینی شده در شش ایستگاه بویه در بازه زمانی یک ماهه (نمودار قرمز رنگ: داده‌های معلوم، نمودار سبز رنگ: داده‌های پیش‌بینی شده)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]



شکل ۴ (ادامه): مقایسه بین داده‌های معلوم و داده‌های پیش بینی شده در شش ایستگاه بویه در بازه زمانی یک ماهه
(نمودار قرمز رنگ: داده‌های معلوم، نمودار سبز رنگ: داده‌های پیش‌بینی شده)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این تحقیق استخراج فرکانس‌های جزرومدی و تعیین مدل مناسب برای پیش بینی جزرومد می‌باشد. برای این منظور از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات که یک روش مشاهده مبنا است، استفاده شده است. روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات برای سری‌های زمانی تک متغیره و چند متغیره قابل استفاده می‌باشد. در این تحقیق در ابتدا مقایسه‌ی بین آنالیز چندمتغیره و تک متغیره صورت گرفته است. به این صورت که برای آنالیز چندمتغیره، طیف توانی یک سری زمانی جزرومدی چندمتغیره شامل ۵۷ ایستگاه بویه محاسبه گردیده است و برای حالت تک متغیره، طیف توانی یک سری زمانی جزرومدی تک متغیره مربوط به یکی از این ۵۷ ایستگاه بررسی شده است. این دو طیف، در حالت کلی شبیه به یکدیگر هستند. تفاوت اصلی بین آنها، توان فرکانس‌های بررسی شده می‌باشد. به این معنا که در حالت چندمتغیره، فرکانس‌های مشترک بررسی‌شده با توان بسیار بیشتری در مقایسه با حالت تک متغیره پدیدار گشته و به راحتی قابل کشف هستند. با بررسی طیف توانی سری زمانی چندمتغیره با استفاده از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات، حضور طیف وسیعی از فرکانس‌ها را در ساختار داده‌های جزر و مدی نشان‌داده‌شده است. علاوه بر فرکانس‌های روزانه و هارمونیک‌های بالاتر آن، تعدادی پیک در اطراف آن‌ها نیز، دیده می‌شد. همچنین، این طیف، نشان‌دهنده حضور فرکانس‌های مربوط به پریود بلند در ساختار داده‌های جزر و مدی بود. به این ترتیب، فرکانس‌های مربوط به ۱۴۶ عدد از پیک‌هایی که در طیف چندمتغیره دارای توان بالاتری نسبت به بقیه پیک‌ها بودند و شامل فرکانس‌های مهم و موثر در پیش‌بینی جزرومد، استخراج گردید. سپس با استفاده از فرکانس‌های مهم استخراجی به پیش‌بینی جزر و مد برای بازه زمانی یک ماه پرداخته شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، پیش‌بینی جزر و مد بر اساس مشاهدات بویه دارای میانگین دقت ۶ سانتیمتر می‌باشد. از طرفی در تمام موارد دقت پیش‌بینی مشاهدات بویه نسبت به مشاهدات ایستگاه‌های تایدگیج از دقت بالاتری در حدود ۹ سانتیمتر برخوردار بودند. که این نشان دهنده دقت بالای مشاهدات بویه می‌باشد. بنابراین استفاده از مشاهدات بویه در کنار مشاهدات تایدگیج در کنار مزایایی از قبیل استقرار آن‌ها در نقاطی با فاصله زیاد از ساحل و نرخ نمونه‌برداری بالاتر، مدلسازی جزرو مد با دقت بالاتر را نیز فراهم می‌کند.

مراجع

[1] K. C. Cheng, "Analysis of water level measurements using GPS", PhD Thesis, The Ohio State University, 2005.

[2] F. J. Büllesfeld, "Ein Beitrag zur harmonischen Darstellung des gezeitenerzeugenden Potentials", Deutsche Geodaetische Kommission Bayer, Akad, Wiss. 314, 1985.

[3] D. E. Cartwright, and R. J. Tayler, "New computations of the tide-generating potential", Geophysical Journal International, 1971.

[4] E. P. Flinchem, and D. A. Jay, "An introduction to wavelet transform tidal analysis methods", Estuarine, Coastal and Shelf Science 51, 2000.

[5] T. Hartmann, and H. G. Wenzel, "The harmonic development of the Earth tide generating potential due to the direct effect of the planets", Geophysical research letters 21, 1994.

[6] B. Ducarme, A. P. Venedikov, A. R. Mesquita, C. A. Sampaio, D. S. Costa, D. Blitzkow, R. Vieira, and S. R. C. Freitas, "New analysis of a 50 years tide gauge record at Cananéia (SP-Brazil) with the VAV tidal analysis program", In Dynamic Planet, pp. 453-460. Springer, Berlin,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

Heidelberg, 2007.

[7] Y. Sakamoto, M. Ishiguro, and G. Kitagawa, G, " Akaike information criterion statistics", Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel, 81, 1986.

[8] P. Capuano, E. De Lauro, S. De Martino, and M. Falanga, " Water-level oscillations in the Adriatic Sea as coherent self-oscillations inferred by independent component analysis", Progress in oceanography 91, 2011.

[9] R. Mousavian, and M. Mashhadi Hossainali, " Detection of main tidal frequencies using least squares harmonic estimation method", Journal of Geodetic Science 2, 2012.

[10] V. Barnett, and T. Lewis, "Outliers in statistical dataWiley", 1974.

[11] A. R. Amiri-Simkooei, S. Zaminpardaz, and M. A. Sharifi, "Extracting tidal frequencies using multivariate harmonic analysis of sea level height time series", J Geod, 2014.

[12] L. Davies, and U. Gather, "The identification of multiple outliers", Journal of the American Statistical Association, 1993.

[13] I. Ben-Gal, O. Maimon, and L. Rockach, "Data Mining and Knowledge Discovery Handbook A Complete Guide for Practitioners and Researchers", Kluwer Academic Publishers, 2005.

[14] M. Kern, T. Preimesberger, M. Allesch, R. Pail, J. Bouman, and R. Koop, "Outlier detection algorithms and their performance in GOCE gravity field processing ", J Geod, 2005.

[15] A. R. Amiri-Simkooei, and J. Asgari," Harmonic analysis of total electron contents time series: methodology and results", GPS Solut, 2012.

[16] A. R. Amiri-Simkooei," Least-squares variance component estimation: theory and GPS applications", PhD thesis, Mathematical Geodesy and Positioning, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology , Delft, Netherlands, 2007.

[17] C.Chen, W. Zhai, L.Yan, Q. Zhang, X. Zhang, J. Zhu, and S.He, "Assessment of the GPS buoy accuracy for altimeter sea surface height calibration", IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3101-3104. (2014).

[18] A. R. Amiri-Simkooei, T. H. Mohammadloo, and D.F. Argus, "Multivariate analysis of GPS position time series of JPL second reprocessing campaign", Journal of Geodesy, 91(6), pp.685-704. 2017.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7 No.1, Spring 2019

Research Paper

Tidal prediction using time series analysis of Buoy observations

Saeed Farzaneh[1*], Mohammad Ali Sharifi[1], Kamal Parvazi[2], Bahare Namazi[3]

1- Assistant Professor, School of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran
2- PhD Student of Geodesy, School of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran
3- Msc. Student of Geodesy, School of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

Abstract

Although tidal observations which are extracted from coastal tide gages, have higher accuracy due to their higher sampling rate, installing these types of gages can impose some spatial limitation since we cannot use every part of sea to install them. To solve this limitation, we can employ satellite altimetry observations. However, satellite altimetry observations have lower sampling rate. According to spatial limitation in installing tide gages and lower rate of satellite altimetry observations, we need observation as along with gathered information which can solve those two main margins. Buoy observations not only for its higher accuracy and sampling rate, but also because of its exclusive features can let us observe further coastal regions to record sea level observations. In this study, buoy observations are analyzed using Least Square Harmonic Estimation (LS-HE) method. According to this, important frequencies in those data can be extracted. This process is equally important in Tidal modeling as well as prediction. Tidal modeling and prediction are based on frequency which is derived from observations. In this contribution, time-series data of 57 buoy stations from 2005 to 2017 are processed and a list of important frequencies is prepared. In the following, the comparison between tidal prediction modeling extracted from buoy and tide gage observation was made by using this frequency list. Tide prediction of all the stations during a month was made according to important frequency list extracted in this study. The average RMSE for predicted data in buoy stations has been about 6 cm. Finally, to validate buoy's data, comparison between buoy and tide gage data was made which\ represents about 9 cm difference in sea level prediction.

Key words: *Buoy observations, Time series analysis, Least square harmonic estimation, Tidal frequency, Tidal Prediction.*

Correspondence Address. *School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, North Kargar Ave., Jalal Al. Ahmad Crossing, Tehran, Iran.*
Tel: +98 (0)21 88008841.
Email: *farzaneh@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.211]