

پتانسیل جزر و مدی و تغییر شکل پوسته‌ای حاصل از آن مطالعه موردی: جابجایی پوسته در ایران

علیرضا آزموده اردلان^{۱*} و بهنام حضرتی صومعه^۲

^۱ استاد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری در مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
^۲ دانش‌آموخته کارشناس ارشد هیدروگرافی مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری در مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۸۷۷۶، پذیرش نهایی: ۸۹۱۱/۱۹)

چکیده

در این تحقیق، بر مبنای پتانسیل جزر و مدی، تاثیر جزر و مد بر میدان گرانی، تغییر شکل پوسته زمین بر اثر نیروی جزر و مدی، و تغییرات میدان گرانی بر اثر تغییر شکل جزر و مدی پوسته ارائه گردیده است. پتانسیل جزر و مدی به سه مولفه ثابت، تناوبی نیم‌روزانه، و تناوبی روزانه تقسیم و تغییر شکل پوسته تحت تاثیر هر یک از این مولفه‌ها در سه راستای شعاعی، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی محاسبه گردیده است. برای انجام محاسبات یاد شده، که روند آنرا می‌توان بصورت ذیل خلاصه نمود، نرم‌افزاری با قابلیت محاسبه پتانسیل جزر و مدی و تغییر شکل ناشی از آن در زمانها و مکانهای مختلف ارائه گردیده است. (۱) بکارگیری مختصات بدی ماه و خورشید (α, δ) و زمان برای تعیین زوایای زینتی اجرام سماوی بصورت تابعی از زمان و موقعیت بر روی زمین، (۲) محاسبه مولفه‌های تناوبی و دائمی پتانسیل جزر و مد برای نقاط واقع بر سطح زمین بر حسب زمان، (۳) محاسبه بردار جابجایی پوسته تحت تاثیر نیروی جزر و مدی در سه راستای شعاعی، شرق-غربی و شمالی-جنوبی، (۴) ارائه پتانسیل جزر و مدی و تغییر شکل حاصل از آن بصورت گرافیکی و جدولی. به عنوان مطالعه موردی، با استفاده از نرم‌افزار یاد شده، پتانسیل جزر و مدی و تغییر شکل پوسته در ایران در مکانها و زمانهای مختلف محاسبه و ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل جزر و مدی، تغییر شکل پوسته، مولفه تناوبی روزانه، مولفه تناوبی نیم‌روزانه، تغییر شکل شعاعی، تغییر شکل شمالی-جنوبی، تغییر شکل شرقی-غربی

Tidal potential and its related crustal deformation, Case study: Tide driven crustal deformation in Iran

Ardalan, A. A.¹, Hazrati, B.²

¹ Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Prevention, University of Tehran, Iran

² M.Sc. in Hydrography Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Prevention, University of Tehran, Iran

(Received: 27 Sep 2008, Accepted: 8 Feb 2011)

Abstract

Using tidal potential, the effect of tide on the gravity field, crustal deformation due to tidal force, and gravity variations resulted from the crustal deformation are presented. Tidal potential is divided into constant and periodic (diurnal and semi-diurnal) constituents, and for each constituents crustal displacements in radial, South-North, and East-West directions are computed. The aforementioned computations, which algorithmically can be summarized as follows, are implemented in a software with the capability of computing the tidal potential and the resulting crustal deformation at any time and location: (i) Using right ascension coordinates (α, δ) of the Moon and Sun, and time, zenith angle of the celestial bodies is computed as a function of time and location on

the surface of the Earth. (ii) Constant and periodic constituents of the tidal potential are computed for the given points on Earth surface at the given times. (iii) Crustal displacements caused by the tidal force in the radial, South-North, and East-West directions are computed. (iv) The computed tidal potential constituents and the related tidal displacements are presented in both graphical and tabular formats. As the case study, using the aforementioned software, tidal potential and tidal deformation of the crust at geographical region of Iran is computed. Among the practical applications of this study and the developed software followings are outstanding: (i) Removal of the crustal deformation due to tide from the Global Navigation Satellite System (GNSS) observations. (ii) Removal of direct tidal effect from gravity observations. (iii) Removal of the indirect tidal gravity effect due to crustal deformation from the gravity observations. (iv) Removal of the direct tidal effect from the geoid. (v) Removal of indirect effect due to crustal deformation from the geoid. (vi) Removal of the tidal effects from the height systems.

Key words: Tidal potential, Crustal deformation, Tidal constituents, Semi Diurnal, Diurnal, Permanent tidal constituent, Radial displacement, South-North displacement, East-West displacement.

۱ مقدمه

خورشید بیشترین تاثیرات جزر و مدی را بوجود می‌آورند، در عمل می‌توان از اثر سایر اجرام سماوی در مقابل آنها صرفنظر نمود. اصلی‌ترین تاثیر جزر و مدی در رابطه (۱) تا درجه $n = 2$ بوده که آن را می‌توان بصورت ذیل نوشت (کودریافسف، ۲۰۰۳):

$$W_2(t) = \frac{3}{4} \frac{GM_s R^2}{\rho_s^3(t)} (\cos 2z + \frac{1}{3}) \quad (2)$$

بر اساس ونیچک (۱۹۷۳) حذف درجات بالاتر از دو در بسط (۱) تنها باعث 0.03% خطا در نتیجه پتانسیل محاسبه شده می‌گردد.

بر اساس مثلثات نجومی، رابطه زاویه زینتی (z) با بعد (δ) جسم سماوی مورد رصد در مکانی به عرض ژئوستریک φ در زاویه ساعتی h بصورت ذیل می‌باشد (اوکی و همکاران ۱۹۸۲):

$$\cos z = \cosh \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (3)$$

با جایگزینی رابطه (۳) در (۲)، به رابطه ذیل موسوم به معادله جزر و مدی لاپلاس خواهیم رسید:

تغییر شکل پوسته زمین تحت تاثیر نیروی جزر و مدی را می‌توان به دو بخش تناوبی (وابسته به زمان) و دائمی (مستقل از زمان) تقسیم نمود. نیروی جزر و مدی بصورت مستقیم موجب تغییر در گرانی زمین گردیده و بعلاوه تغییر شکل پوسته تحت تاثیر نیروی جزر و مدی خود عاملی ثانویه در تغییر میدان گرانی است. بدین خاطر اطلاع از پتانسیل تولید کننده نیروی جزر مدی و نیز تغییر شکل پوسته‌ای حاصل آن برای بسیاری از مطالعات و کاربردهای ژئودزی و ژئوفیزیک مورد نیاز می‌باشد. پتانسیل جزر و مدی در نقطه‌ای مانند A بر روی سطح زمین را می‌توان به صورت زیر نوشت (کودریافسف، ۲۰۰۳):

$$W_A(t) = \sum_S GM_S \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R^n}{\rho_s^{n+1}(t)} P_n(\cos z_S(t)) \quad (1)$$

در رابطه فوق G ثابت جهانی نیوتن، M_S جرم جسم سماوی، R و ρ_s به ترتیب فاصله ژئوستریک A و مرکز جرم جسم سماوی تا مرکز جرم زمین، P_n تابع لژاندر و $z_S(t)$ زاویه زینتی جسم سماوی از نقطه A می‌باشد. در میان اجرام سماوی، از آنجائی که ماه و

Z در $\varphi = \pm 35.27^\circ$ صفر و در قطبین دارای بیشترین مقدار است. بنابر ملاحظه می‌گردد که، بر مبنای S ، T و Z ، W_2^S در رابطه (۵) به سه جزء روزانه DS ، W_2^Z نیم‌روزانه DT و دائمی DZ تجزیه گردیده است. نکته حائز اهمیت آنکه متوسط زمانی مولفه‌های تناوبی S و T بر طبق رابطه ذیل صفر بوده در حالی که متوسط Z صفر نیست:

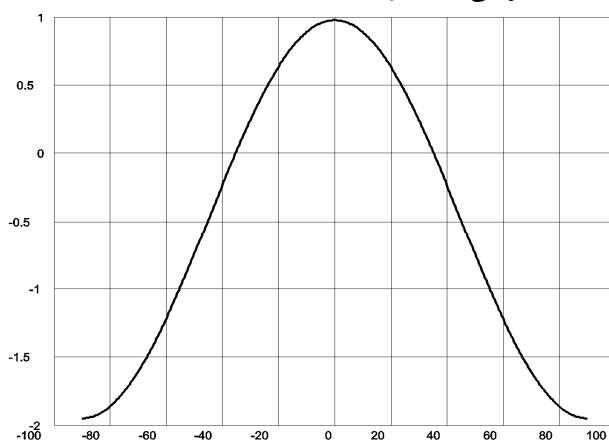
$$\bar{W}_2^S + \bar{W}_2^T = \frac{D}{2\pi} \int_0^{2\pi} (S + T) dh = 0 \quad (10)$$

اگر میل ماه یا خورشید را طبق رابطه (۱۱) بر حسب زاویه میل صفحه اکلپتیک (ε) و طول اکلپتیکی (L) ماه و خورشید نوشته و بر روی (L) انتگرال بگیریم، با فرض ثابت بودن ε ، به رابطه (۱۲) می‌رسیم.

$$\sin \delta_s \approx \sin \varepsilon \sin L \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 3\left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3}\right) \left(\sin^2 \delta_s - \frac{1}{3}\right) dL \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 3\left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3}\right) \left(\sin^2 \varepsilon \sin^2 L - \frac{1}{3}\right) dL \\ &= D \left(\frac{1}{2} \sin^2 \varepsilon - \frac{1}{3}\right) (3 \sin^2 \varphi - 1) \end{aligned} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) اولین بار توسط داروین ارائه گردید. شکل ۱ نشان دهنده تغییرات مولفه دائمی متوسط (\bar{Z}) پتانسیل جزرو مد بر حسب عرض ژئوسنتریک (φ) می‌باشد.



شکل ۱. تغییرات مولفه دائمی متوسط پتانسیل جزرو مد (\bar{Z}) بر حسب عرض ژئوسنتریک (φ).

$$\begin{aligned} W_2(t) &= D(\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2h \\ &\quad + \sin 2\varphi \sin 2\delta \cosh \\ &\quad + 3(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3})(\sin^2 \delta - \frac{1}{3})) \end{aligned} \quad (4)$$

$$W_2(t) = D(S(t) + T(t) + Z) \quad (5)$$

که در آن

$$D = \frac{3}{4} GM_s \frac{R^2}{\rho^3} \quad (6)$$

$$S(t) = \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2h \quad (7)$$

$$T(t) = \sin 2\varphi \sin 2\delta \cosh \quad (8)$$

$$Z = 3(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3})(\sin^2 \delta - \frac{1}{3}) \quad (9)$$

D که ثابت دودسون نامیده می‌شود برای ماه برابر 2.63×10^5 (m.mGal) و برای خورشید برابر 1.21×10^5 [m.mGal] است (ونیچک، ۱۹۷۳). همچنین در رابطه (۵)، S مولفه سکتوریال (Sectorial) و T مولفه تسرال (Tesseral) هر دو تابعی از زاویه ساعتی (h) بوده و بنابر این با زمان تغییر می‌کنند. مولفه S در استوا بیشترین مقدار را داشته و در قطبین صفر بوده، در حالیکه مولفه T در عرض ژئوسنتریک $\varphi = \pm 45^\circ$ دارای بیشترین مقدار و در استوا و قطبین دارای کمترین مقدار است. در رابطه (۵) Z که مولفه زونال (Zonal) نامیده می‌شود، به زمان بستگی نداشته و تنها تابعی از عرض ژئوسنتریک و میل ماه یا خورشید بوده و بدین خاطر آنرا مولفه دائمی (Permanent) نیز می‌نامند. مولفه

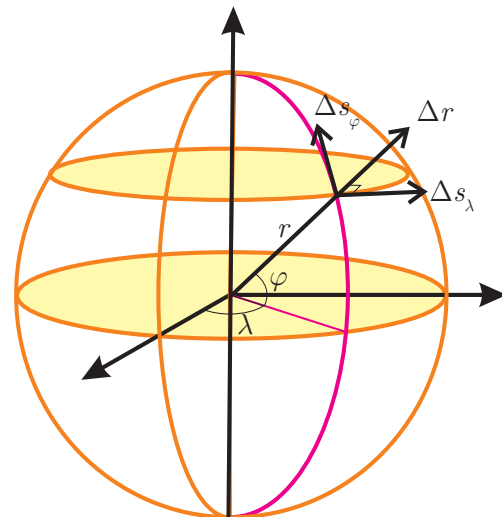
۲ تعیین بردار جابجایی پوسته زمین

جابجایی پوسته یک زمین کروی الاستیک تحت تاثیر نیروی جزر و مدی در امتداد شعاعی r ، در جهت φ و λ (رجوع به شکل ۲) بر مبنای عدد اول لاو k_1 (first Love number) و عدد شیدا l (Shida number) می توان به صورت ذیل نوشت:

$$\Delta r = \frac{k_1}{g} W_2 \quad (13)$$

$$\Delta s_\varphi = \frac{l}{g} \frac{\partial W_2}{\partial \varphi} \quad (14)$$

$$\Delta s_\lambda = \frac{l}{g \cos \varphi} \frac{\partial W_2}{\partial \lambda} \quad (15)$$



شکل ۲. مولفه های بردار جابجایی جزر و مدی پوسته زمین.

تغییر شکل پوسته باعث تغییر در میدان گرانی گردیده که خود باعث تغییر در مکان سطوح هم پتانسیل خواهد شد. بنابر این در محاسبه ارتفاعات نسبت به ژئوئید این دو اثر مستقیم و غیر مستقیم نیروی جزر و مدی را لحاظ نمود. برای این منظور با توجه به شکل ۳، می توان برای جابجایی پوسته و ژئوئید تحت تاثیر پتانسیل مستقیم جزر و مدی و تغییر ایجاد شده معادله ذیل را تشکیل داد (پوتانن و همکاران، ۱۹۹۶):

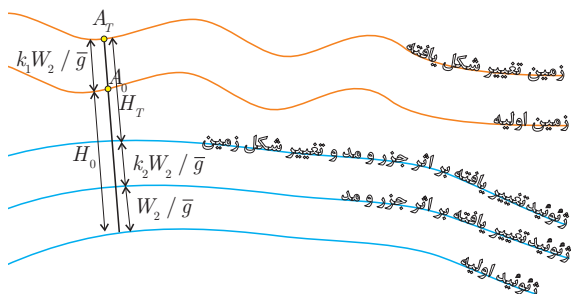
$$H_A + \frac{k_2 W_2}{g} + \frac{W_2}{g} = H_0 + \frac{k_1 W_2}{g} \quad (16)$$

که در آن H_A ارتفاع ارتومتریک نقطه A_r جابجا شده از نقطه A_0 تحت نیروی جزر و مدی، W_2 پتانسیل جزر و مدی، \bar{g} شتاب جاذبه میانگین در امتداد خط شاغولی، k_1 مدی، و k_2 به ترتیب اعداد اول و دوم لاو، و H_0 ارتفاع ارتومتریک نقطه A_0 است. اگر معادله (۱۳) را به صورت ذیل بنویسیم، به رابطه ای برای تغییر شکل پوسته تحت تاثیر نیروی جزر و مدی خواهیم رسید:

$$\begin{aligned} \Delta H &:= H_0 - H_A = \frac{W_2}{g} + \frac{k_2 W_2}{g} - \frac{k_1 W_2}{g} \\ &= \frac{W_2}{g} (1 + k_2 - k_1) \end{aligned} \quad (17)$$

که با در نظر گرفتن رابطه ارتفاع ارتومتریک با اعداد ژئوپتانسیلی $H_A = C_A / \bar{g}$ و $H_0 = C_0 / \bar{g}$ می توان از معادله (۱۴) به رابطه ذیل که نشان دهنده تغییر در پتانسیل نقطه تحت تاثیر نیروی مستقیم جزر و مدی و جابجایی ناشی از آن می باشد، رسید:

$$\Delta W := C_0 - C_A = W_2 (1 + k_2 - k_1) \quad (18)$$



شکل ۳. جابجایی شعاعی پوسته و ژئوئید تحت تاثیر نیروی جزر و مدی.

جداول ۱ و ۲ نشان دهنده مقادیر اعداد اول و دوم لاو و عدد شیدا برای مولفه های مختلف جزر و مدی است (مکارتی و پتیت، ۲۰۰۳).

لازم به توضیح است که روابط ارائه شده این در بخش برای یک زمین کروی الاستیک بوده و با توجه به کوچک بودن تاثیر بیضویت بر نتایج، تاکنون روابطی برای زمین بیضوی در این مورد ارائه نشده است.

در رابطه (۲۰)، $\alpha(t)$ بعد ماه یا خورشید در لحظه t و LMST زمان نجومی متوسط محلی است که با زمان نجومی متوسط گرینویچ (GMST) به صورت ذیل در از تباط است:

$$\text{LMST} = \text{GMST} + \lambda \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، λ طول جغرافیایی نقطه A می‌باشد. برای محاسبه GMST می‌توان از رابطه ذیل استفاده نمود (اوکی و همکاران، ۱۹۸۲؛ کاپلان، ۲۰۰۵):

$$\begin{aligned} \text{GMST} = & 100.46061837 + 36000.770053608T \\ & + 0.000387933T^2 - T^3 / 38710000 \end{aligned} \quad (22)$$

در رابطه فوق $T = (\text{JD} - 2451545) / 36525$ و JD تاریخ ژولین است. با قرار دادن رابطه (۲۲) در رابطه (۷) برای مولفه S داریم:

$$W_2^S = D(\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2(\text{GMST} + \lambda - \alpha(t))) \quad (23)$$

به طور مشابه برای W_2^T با توجه به رابطه (۸) داریم:

$$W_2^T = D(\sin 2\varphi \sin 2\delta \cos(\text{GMST} + \lambda - \alpha(t))) \quad (24)$$

اگر از روابط (۲۳)، (۲۴) و (۹) نسبت به (φ, λ) مشتق بگیریم، پس از ساده کردن به مولفه‌های بردار جابجائی مندرج در جدول ۳ خواهیم رسید:

۳ محاسبه بردار جابجائی جزر و مدی پوسته در ایران
با در دست داشتن روابط مربوط به تغییر شکل پوسته بر اثر نیروی جزر و مدی، در این بخش نتایج محاسبه صورت گرفته برای پوسته زمین در منطقه جغرافیائی ایران ارائه خواهند شد. شکل ۴ و ۵ نشان دهنده جابجائی جزر و مدی پوسته (بر حسب سه مولفه Δr ، Δs_φ و Δs_λ) در دو نقطه به مختصات $(\varphi = 27^\circ, \lambda = 62^\circ)$ در سیستان و بلوچستان و $(\varphi = 39^\circ, \lambda = 45^\circ)$ در آذربایجان غربی، در طی ۱۵ روز در سال ۲۰۰۴ در فواصل زمانی ۱ ساعته،

جدول ۱. عدد دوم لای برای ضرایب مختلف بسط پتانسیل (مکارتی و پیت، ۲۰۰۳).

n	m	k_{2nm}
2	0	0.29525
2	1	0.29470
2	2	0.29801
3	0	0.093
3	1	0.093
3	2	0.093
3	3	0.094

جدول ۲. عدد اول لای k_1 و عدد شیدا l برای فرکانسهای اصلی جزر و مدی (مکارتی و پیت، ۲۰۰۳).

	Tidal constituent	h	k_1
Semidiurnal	M_2	0.6078	0.0847
	S_2		
	N_2		
Diurnal	Q_1	0.6036	0.0846
	O_1	0.6028	0.0846
	P_1	0.5817	0.0853
	K_1	0.5236	0.0870
Long period	S_{sa}	0.6182	0.0886
	M_m	0.6126	0.0870
	M_f	0.6109	0.0864

مقادیر مورد استفاده در محاسبات مقادیر متوسط k_1 ، k_2 و l به شرح ذیل است:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.6 \\ k_2 &= 0.298 \\ l &= 0.085 \end{aligned} \quad (19)$$

روابط (۱۳) الی (۱۵) را همچنین می‌توان برای هر سه مولفه پتانسیل جزر و مد مشخص شده در رابطه (۵) بصورت مجزا محاسبه نمود. برای این منظور از با توجه به وابستگی روابط (۱۳) و (۱۴) به زاویه ساعتی h تساوی ذیل را در نظر می‌گیریم:

$$h = \text{LMST} - \alpha(t) \quad (20)$$

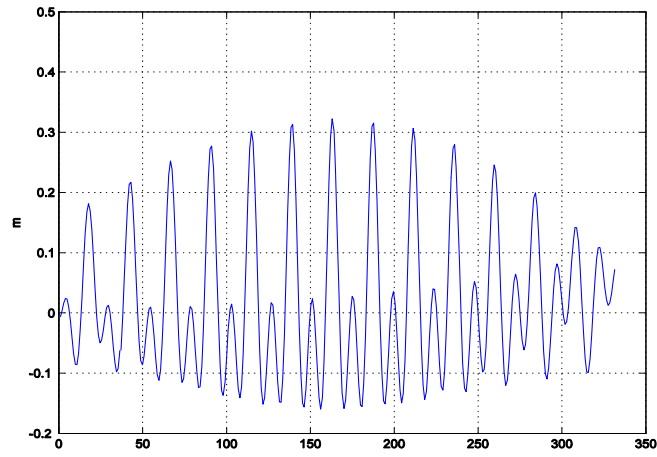
تحت تاثیر حاصل جمع مولفه‌های متناوبی نیم‌روزانه و روزانه جزر مدی ($W_2^T + W_2^S$) است. بیشینه و کمینه نقطه یاد شده در جدول ۴ آورده شده است. مولفه‌های بردار جابجایی ناشی از $W_2^T + W_2^S$ در دو

جدول ۳. مولفه‌های بردار جابجایی برای مولفه‌های نیم‌روزانه، روزانه و دائمی پتانسیل جزر و مد در رابطه.

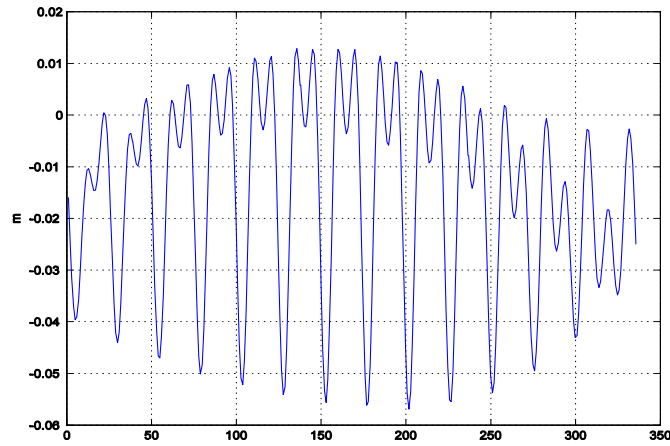
مولفه‌های جزر و مدی	جابجایی پوسته
Δr (جابجایی شعاعی)	
نیم‌روزانه (W_2^S)	$\frac{k_1}{g} D(\cos^2 \phi \cos^2 \delta \cos 2h)$
روزانه (W_2^T)	$\frac{k_1}{g} D(\sin 2\phi \sin 2\delta \cos h)$
دائمی (W_2^Z)	$3 \frac{k_1}{g} D(\sin^2 \phi - \frac{1}{3})(\sin^2 \delta - \frac{1}{3})$
Δs_ϕ (جابجایی شمالی-جنوبی)	
نیم‌روزانه (W_2^S)	$-\frac{l}{g} D \sin 2\phi \cos^2 \delta \cos 2h$
روزانه (W_2^T)	$2 \frac{l}{g} D \cos 2\phi \sin 2\delta \cos h$
دائمی (W_2^Z)	$3 \frac{l}{g} D \sin 2\phi (\sin^2 \delta - \frac{1}{2})$
Δs_λ (جابجایی شرقی-غربی)	
نیم‌روزانه (W_2^S)	$-2 \frac{l}{g} D \cos \phi \cos^2 \delta \sin 2h$
روزانه (W_2^T)	$-2 \frac{l}{g} D \sin \phi \sin 2\delta \sin h$
دائمی (W_2^Z)	0

جدول ۴. مقادیر بیشینه و کمینه مولفه‌های بردار جابجایی ناشی از $W_2^T + W_2^S$ در دو نقطه یاد شده در آذربایجان غربی و سیستان و بلوچستان.

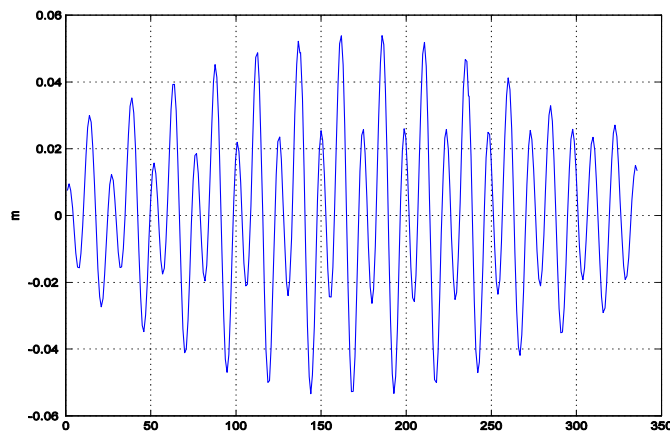
آذربایجان غربی			
	Δr	Δs_λ	Δs_ϕ
Max.	0.298	0.052	0.023
Min.	-0.15	-0.05	-0.03
سیستان و بلوچستان			
	Δr	Δs_λ	Δs_ϕ
Max.	0.306	0.054	0.023
Min.	-0.17	-0.05	-0.04



الف. مولفه شعاعی (Δr)

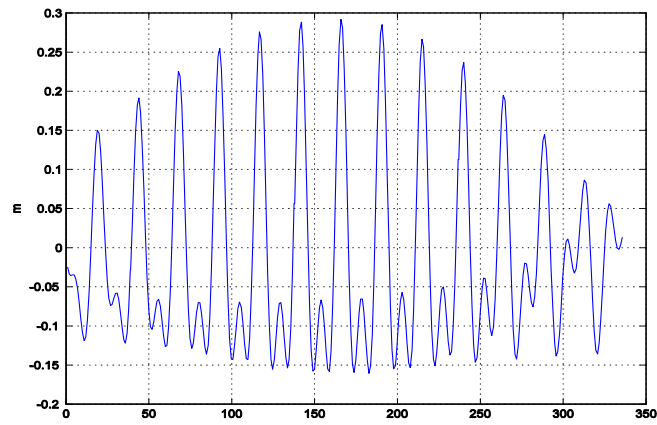


ب. مولفه شمالی-جنوبی (Δs_φ)

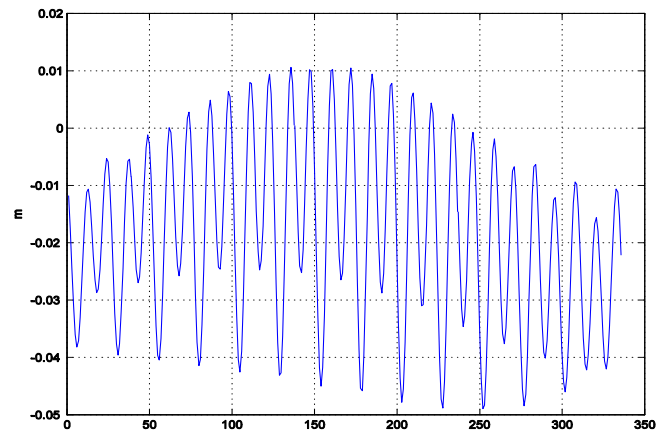


ج. مولفه شرقی-غربی (Δs_λ)

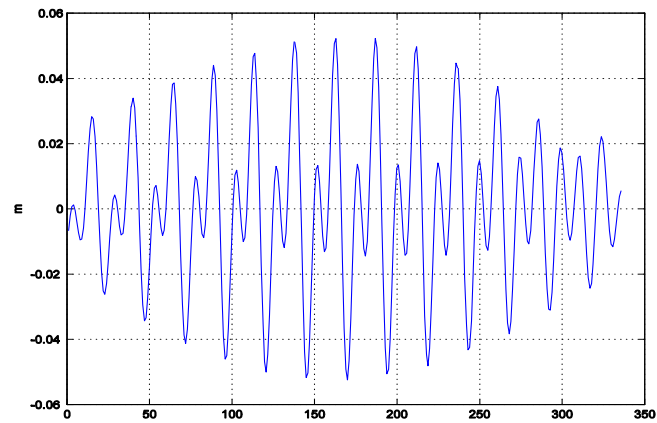
شکل ۴. تغییرات شکل پوسته بر حسب متر، تحت تأثیر مجموع مولفه‌های روزانه و نیم روزانه $(W_2^T + W_2^S)$ در نقطه‌ای به مختصات $(\varphi = 27^\circ, \lambda = 62^\circ)$ در سیستان و بلوچستان.



الف. مولفه شعاعی (Δr)

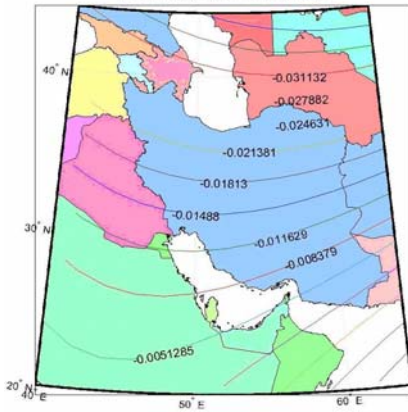


ب. مولفه شمالی-جنوبی (Δs_φ)

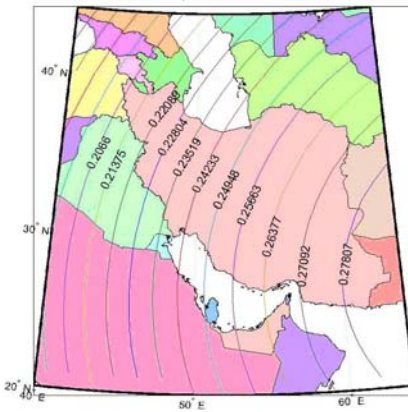


ج. مولفه شرقی-غربی (Δs_λ)

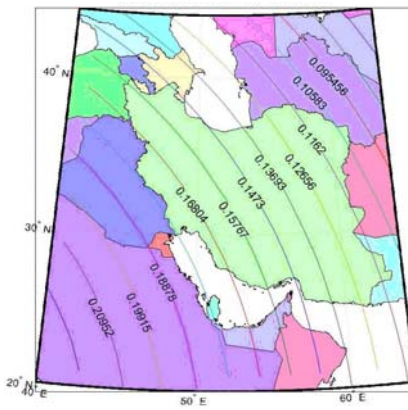
شکل ۵. تغییرات شکل پوسته بر حسب متر، تحت تاثیر مجموع مولفه‌های روزانه و نیم روزانه ($W_2^T + W_2^S$) در نقطه‌ای به مختصات $(\varphi = 39^\circ, \lambda = 45^\circ)$ در آذربایجان غربی.



شکل ۷. جابجایی قائم پوسته ایران برای ساعت ۱۰:۰۰ am روز ۲۰۰۴/۱/۲.



شکل ۸. جابجایی قائم پوسته ایران برای ساعت ۰۷:۰۰ pm روز ۲۰۰۴/۱/۳.



شکل ۹. جابجایی قائم پوسته ایران برای ساعت ۰۲:۰۰ am روز ۲۰۰۴/۱/۱۱.

۴ نتیجه گیری

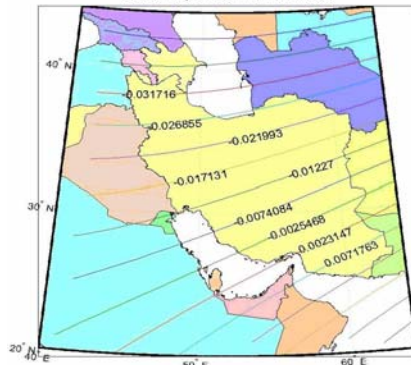
تجزیه پتانسیل جزر و مدی به مولفه‌های دائمی، تناوبی نیم‌روزانه، و تناوبی روزانه ارائه و برای هر یک از این

جدول ۵ حاوی مقادیر مختلف مولفه‌های شعاعی (Δr) و شمال-جنوبی Δs_φ تغییر شکل پوسته تحت تاثیر مولفه دائمی جزر و مد (W_2^Z) بر حسب عرض‌های ژئوسنتریک تصحیحی ثابت بر روی مختصات ژئوسنتریک نقاط واقع بر سطح زمین اعمال گردند.

جدول ۵. مولفه‌های شعاعی (Δr) و شمال-جنوبی (Δs_φ) تغییر شکل پوسته تحت تاثیر مولفه دائمی جزر و مد (W_2^Z).

φ°	(m) Δs_φ	(m) Δr
24	-0.0122	0.0237
25	-0.0126	0.0219
26	-0.0129	0.0199
27	-0.0133	0.018
28	-0.0136	0.0159
29	-0.0139	0.0139
30	-0.0142	0.0118
31	-0.0145	0.0096
32	-0.0147	0.0074
33	-0.0150	0.0052
34	-0.0152	0.0029
35	-0.0154	0.0006
36	-0.0156	-0.0017
37	-0.0158	-0.0041
38	-0.0159	-0.0064

همچنین مولفه جابجایی قائم پوسته زمین در منطقه جغرافیایی ایران بر روی شبکه‌ای منظم به ابعاد $1^\circ \times 2^\circ$ در زمانهای گوناگون محاسبه و در اشکال ۱۱ تا ۱۸ نمایش داده شده اند.



شکل ۶. جابجایی قائم پوسته ایران برای ساعت ۱۰:۰۰ am روز ۲۰۰۴/۱/۱.

مؤلفه‌ها جابجائی پوسته زمین (با فرض عکس‌العمل الاستیک) در سه راستای شعاعی، شمال-جنوبی، و شرقی-غربی محاسبه گردید. روابط ارائه شده به عنوان نمونه برای محاسبه تغییرات پوسته ایران در ایران بکار برده شد. از جمله کاربردهای عملی این تحقیق می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: (۱) حذف اثر جزر و مدی از روی مشاهدات Global Navigation Satellite Systems (GNSS). (۲) حذف اثر مستقیم جزر و مدی از مشاهدات گرانی. (۳) حذف اثر غیر مستقیم تغییر در گرانی زمین به خاطر جابجائی جابجائی جزر و مدی پوسته. (۴) حذف جابجائی ارتفاعی ژئوئید تحت اثر مستقیم جزر و مدی. (۵) حذف جابجائی ارتفاعی ژئوئید بخاطر تغییر در گرانی زمین بر اثر جابجائی جزر و مدی پوسته. نرم‌افزار تهیه شده در این تحقیق می‌تواند به سهولت هر یک از اثرات یاد شده را برای هر نقطه یا منطقه‌ای از زمین در هر زمان یا بازه زمانی محاسبه و به صورت عددی یا گرافیکی در اختیار کاربر قرار دهد.

منابع

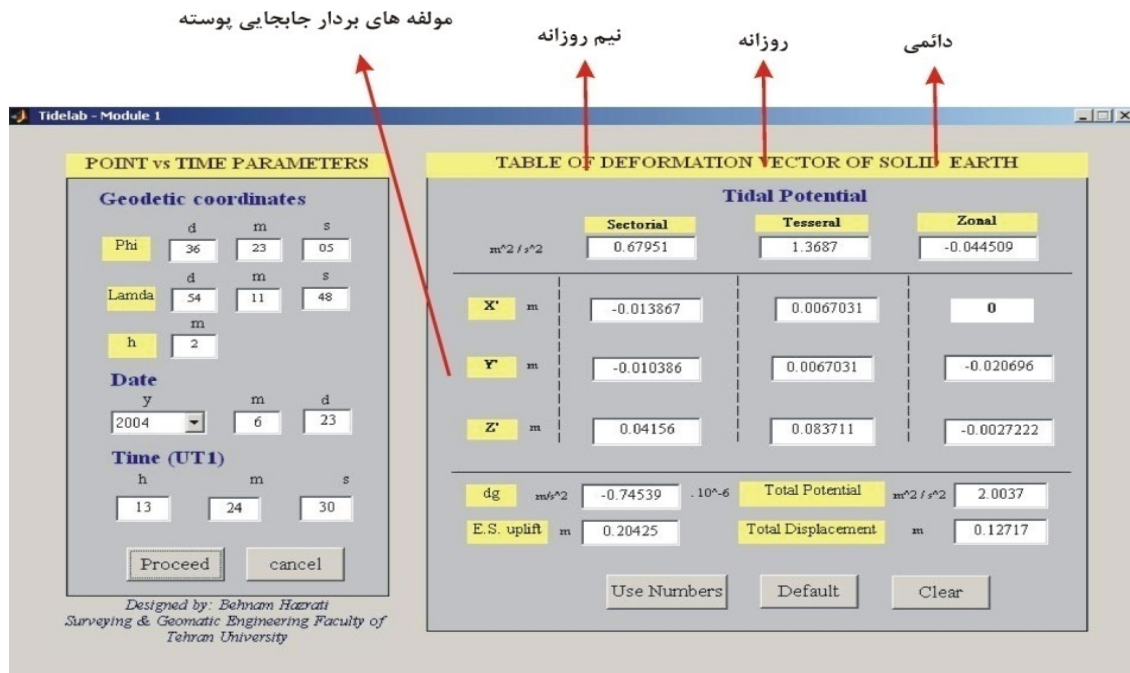
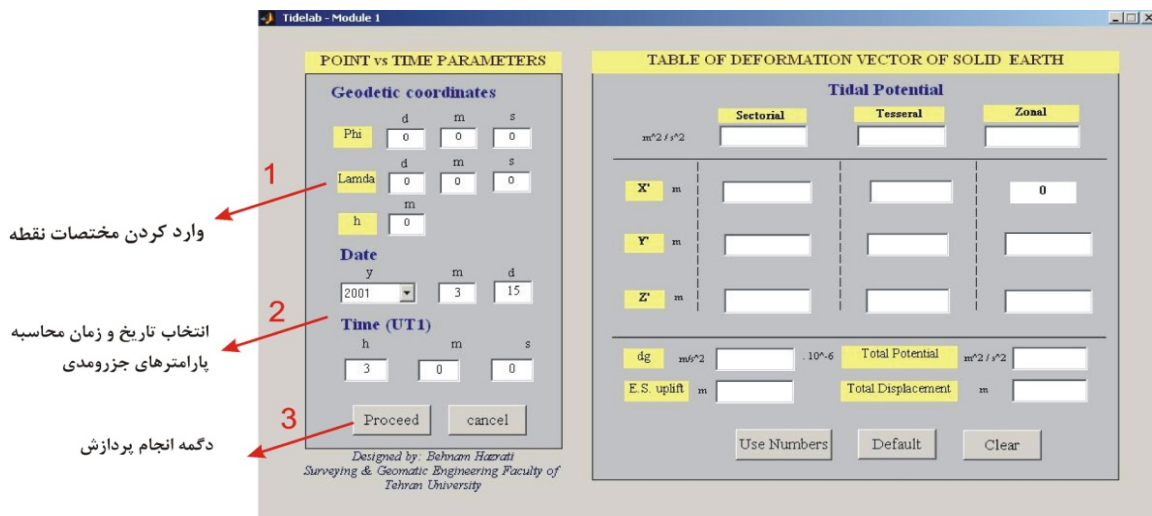
- Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G. H., Kinoshita, H., McCarthy, D. D. and Seidelmann, P. K., 1982, The New Definition of Universal Time, *Astron. Astrophys*, **105**, 359-361.
- Kaplan, G. H., 2005, The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales, and Earth Rotation Models, U.S. Naval Observatory Circular, No. 179.
- Kudryavtsev, S. M., 2004, Improved harmonic development of the Earth tide-generating potential, *Journal of Geodesy*, **77**(12), 829-838.
- Poutanen, M., Vermeer, M., Mäkinen, J., 1996, The permanent tide in GPS positioning, *Journal of Geodesy*, **70**(8), 499-504.
- McCarthy, D. D., Petit, G. (eds.), 2003, IERS Conventions, International Earth Rotation and Reference Systems Service, technical notes, No. 32.
- Vanicek, P., THE EARTH TIDES, 1973, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Lecture notes, No. 36.

ضمیمه

معرفی نرم‌افزار Tidelab

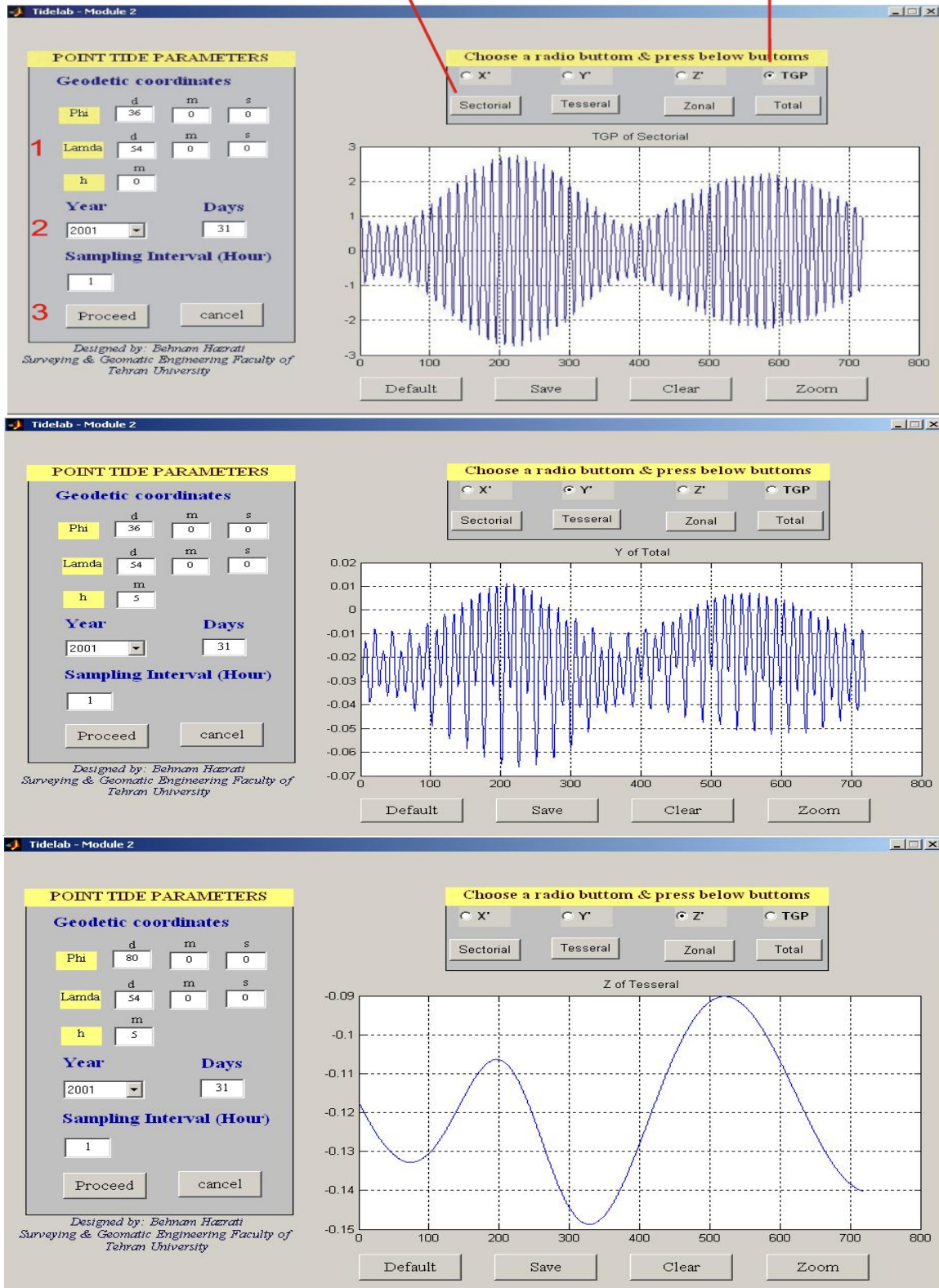
برای سهولت استفاده، مختصات بعدی ماه و خورشید در پایگاه داده این نرم‌افزار قرار داده شده است. این نرم‌افزار دارای سه بخش مختلف بوده که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ به صورت گرافیکی به اختصار معرفی شده‌اند.

به منظور سهولت در محاسبه پتانسیل جزر و مدی و تغییر شکل پوسته تحت تاثیر این اثر در هر نقطه دلخواه بر روی سطح زمین، اقدام به تهیه نرم‌افزاری تحت نام Tidelab در محیط Matlab گردید که در این بخش به اختصار در قابل پنجره‌های ورودی و خروجی داده‌ها معرفی می‌گردد.

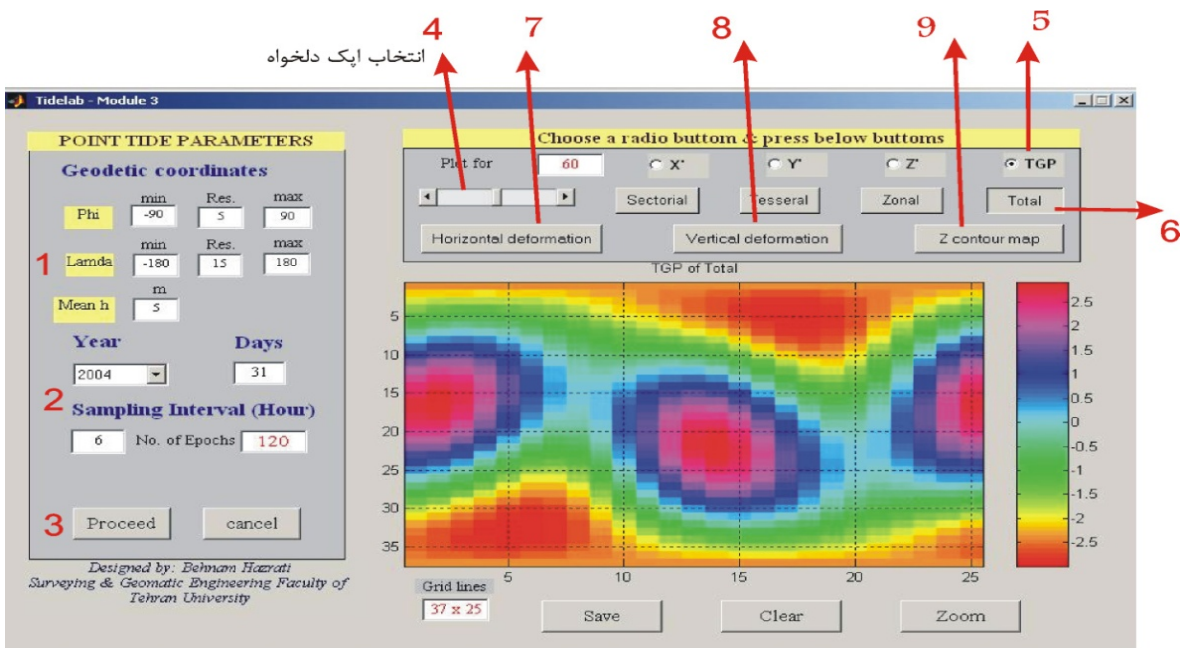
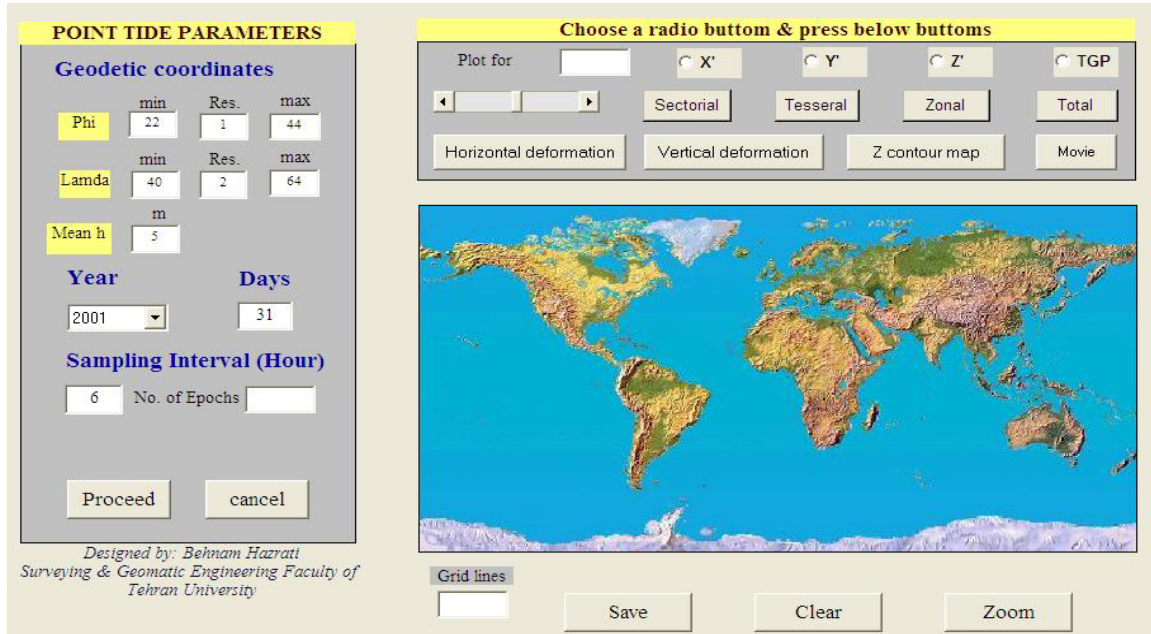


شکل ۱۰. منوی تعیین بردار جابجایی برای یک نقطه در یک اپوک.

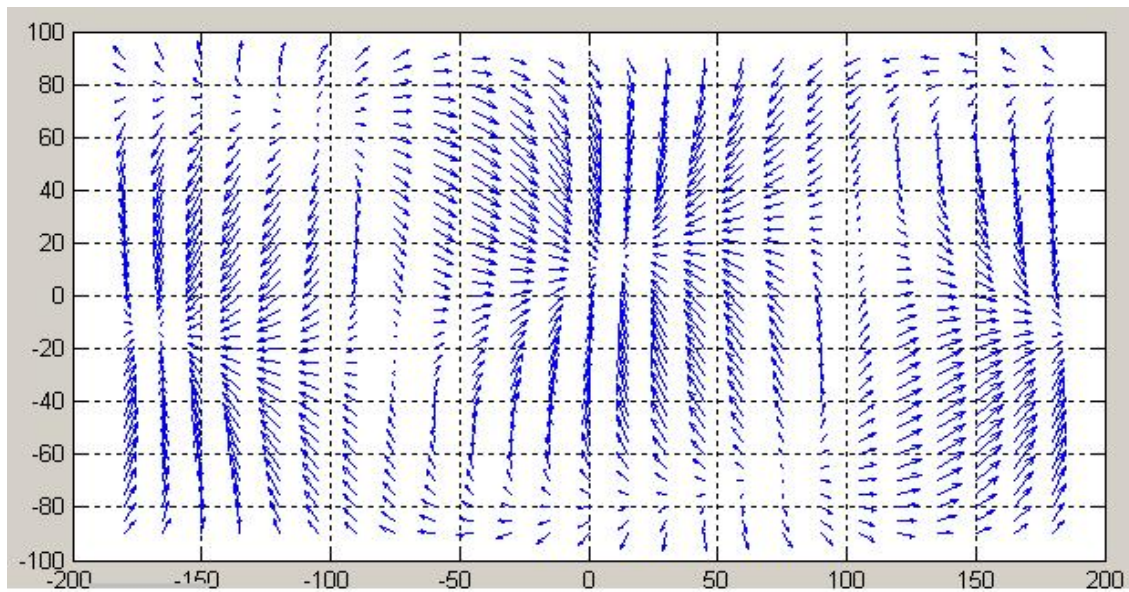
4 انتخاب نمایش پتانسیل یا مولفه بردار 5 انتخاب مولفه پتانسیل جزرومد



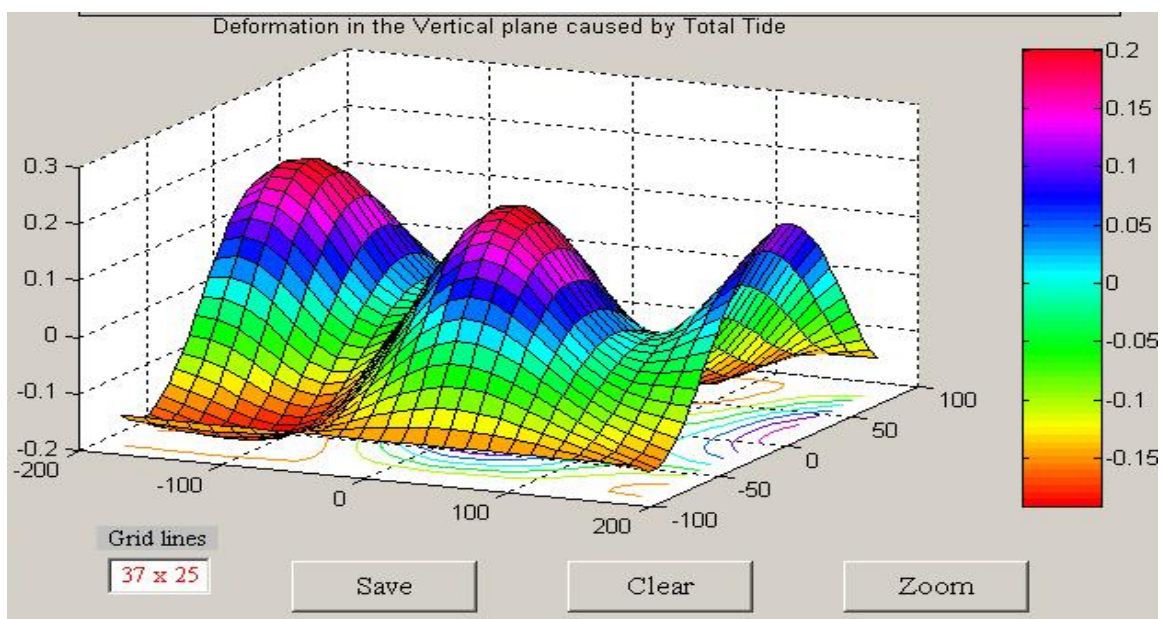
شکل ۱۱. منوی تعیین بردار جایابی برای یک نقطه در یک بازه زمانی.



شکل ۱۲. منوی اولیه تعیین بردار جابجایی برای شبکه جهانی ($\varphi = -90^\circ : 5 : 90^\circ, \lambda = -180^\circ : 15 : 180^\circ$) در بازه زمانی ۳۱ روز اول سال ۲۰۰۴ با ترکیب کلیدهای ۵ و ۶ برنامه.



شکل ۱۳. بردار جابجایی مسطحاتی برای شبکه جهانی ($\varphi = -90^\circ : 5 : 90^\circ, \lambda = -180^\circ : 15 : 180^\circ$) در بازه زمانی ۳۱ روز اول سال ۲۰۰۴ با ترکیب کلیدهای ۶ و ۷ برنامه.



شکل ۱۴. بردار جابجایی قائم برای شبکه جهانی ($\varphi = -90^\circ : 5 : 90^\circ, \lambda = -180^\circ : 15 : 180^\circ$) در بازه زمانی ۳۱ روز اول سال ۲۰۰۴ با ترکیب کلیدهای ۶ و ۸ برنامه.