جدول۱- الف- پارامترهای کارتزین مدل NNR- NUVEL-1A برای ورقه های سنگ کره [4]

نام ورقه	Ω_x (mas/y)	Ω_y (mas/y)	Ω_z (mas/y)	$\|\Omega\|$ (mas/y)
Africa	0.1837	−0.5392	0.8090	1.047283
Antarctica	−0.1693	−0.3508	0.7644	0.857922
Arabia	1.3789	−0.1075	1.3943	1.963923
Australia	1.6169	1.0569	1.2957	2.325992
Caribbean	−0.0367	−0.5982	0.3261	0.771473
Cocos	−2.1503	−4.4563	2.2534	5.436930
Eurasia	−0.2023	−0.4940	0.6503	0.841339
India	1.3758	0.0082	1.4005	1.407265
Nazca	−0.3160	−1.7691	1.9820	2.675424
North America	0.0532	−0.7423	−0.0316	0.744874
Pacific	−0.3115	0.9983	−2.0564	2.307036
South America	−0.2141	−0.3125	−0.1794	0.419141
Philippines	2.0812	−1.4768	−1.9946	3.238944

جدول۱- ب- پارامتر های قطب اولر مدل های NNR- NUVEL-1A، APKIM2000 و ITRF2000 [5]

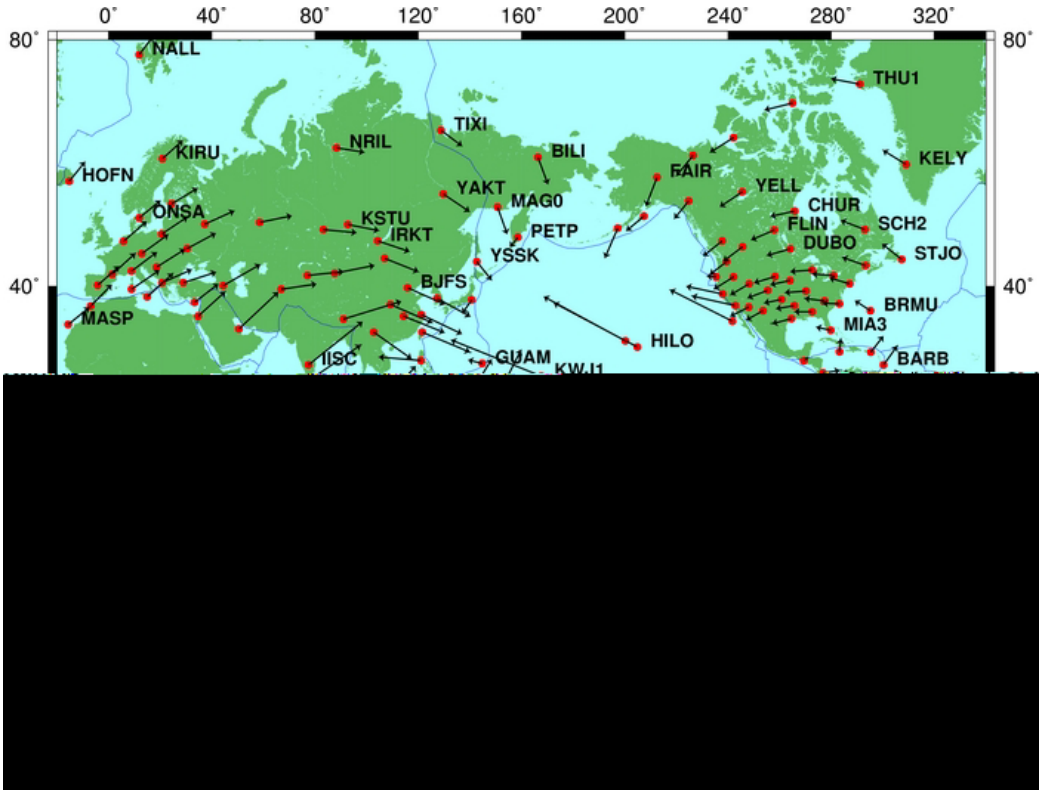
Plate	ITRF2000			APKIM2000.0			NNR NUVEL-1A		
	Φ [°]	Λ [°]	ω [°/Ma]	Φ [°]	Λ [°]	ω [°/Ma]	Φ [°]	Λ [°]	ω [°/Ma]
Africa	51.0 ± 0.6	274.7 ± 1.3	0.271 ± 0.003	52.7 ± 0.6	276.8 ± 1.5	0.269 ± 0.003	50.6	286.0	0.291
Somalia	45.4 ± 4.7	269.2 ± 9.8	0.290 ± 0.027	47.8 ± 4.8	267.4 ± 8.7	0.292 ± 0.026	50.6	286.0	0.291
Antarctica	61.7 ± 0.7	231.3 ± 1.2	0.218 ± 0.005	63.2 ± 1.2	231.5 ± 2.4	0.243 ± 0.011	63.0	244.2	0.238
Arabia	51.2 ± 2.6	353.6 ± 28.0	0.472 ± 0.127	51.8 ± 2.8	350.7 ± 38.7	0.467 ± 0.155	45.2	355.5	0.546
Australia	32.6 ± 0.3	38.1 ± 0.6	0.622 ± 0.003	34.4 ± 0.3	36.9 ± 0.6	0.619 ± 0.004	33.8	33.2	0.646
Caribbea	35.0 ± 4.0	268.3 ± 8.7	0.298 ± 0.073	46.3 ± 8.0	251.7 ± 30.8	0.191 ± 0.068	25.0	267.0	0.214
Eurasia	56.2 ± 0.3	258.6 ± 0.5	0.253 ± 0.001	57.9 ± 0.6	262.9 ± 0.9	0.259 ± 0.002	50.6	247.7	0.234
Asia	52.5 ± 4.8	258.3 ± 5.3	0.316 ± 0.004	68.7 ± 1.1	210.1 ± 11.7	0.368 ± 0.017	50.6	247.7	0.234
India	50.9 ± 1.5	11.9 ± 6.2	0.521 ± 0.015				45.5	0.3	0.545
Nazca	42.1 ± 1.4	257.9 ± 0.4	0.647 ± 0.008	44.8 ± 1.8	262.8 ± 0.7	0.644 ± 0.014	47.8	259.9	0.743
N.America	-4.7 ± 0.5	276.2 ± 0.3	0.193 ± 0.002	-2.4 ± 0.8	280.8 ± 0.4	0.198 ± 0.002	-2.4	274.1	0.207
Pacific	-63.4 ± 0.6	89.1 ± 1.4	0.674 ± 0.012	-65.2 ± 0.2	107.1 ± 1.4	0.658 ± 0.003	-63.0	107.3	0.641
S.America	-18.9 ± 1.7	227.6 ± 3.2	0.115 ± 0.002	-21.7 ± 2.0	230.7 ± 5.2	0.092 ± 0.003	-25.4	235.6	0.116

جدول۱- ج- پارامترهای قطب اولر مدل های NNR- NUVEL-1A و NNR–NUVEL-1B [6]

Plate	NNR-NUVEL-1A			NNR-NUVEL-1B		
	Ω (°/Ma)	λ (°)	φ (°)	Ω (°/Ma)	λ (°)	φ (°)
Africa	0.291	−74.0	50.6	0.291	−73.591	50.640
Antarctic	0.238	−115.8	63.0	0.238	−115.261	63.222
Arabia	0.543	−4.5	45.0	0.544	−4.437	44.935
Australia	0.646	33.2	33.9	0.647	33.154	33.866
Caribbean	0.214	−93.0	25.0	0.214	−92.627	25.135
Cocos	1.510	−115.8	24.5	1.509	−115.758	24.526
Eurasia	0.234	−112.3	50.6	0.234	−111.889	50.806
India	0.545	0.3	45.5	0.546	0.348	45.432
Nazca	0.743	−100.1	47.8	0.743	−99.962	47.850
North America	0.207	−85.9	−2.4	0.207	−85.540	−2.299
South America	0.116	−124.4	−25.3	0.115	−123.920	−25.341
Philippine	0.900	−35.4	−38.0	0.900	−35.319	−37.948
Pacific	0.641	107.3	−63.0	0.641	107.041	−62.990

[a] Ω is the rotation rate, and λ and φ are the longitude and latitude of rotation pole, respectively.

رابطه ی (۸) بردار موقعیت x در زمان t را با استفاده از همین بردار در زمان t_0، در یک دستگاه مرجع یکسان، به دست می دهد. مدل NNR –NUVEL1A می تواند برای به روز کردن مختصات ایستگاه های مرجع به ترتیبی که تا حد امکان به زمان واقعی مشاهدات نزدیک باشند، به کار رود.



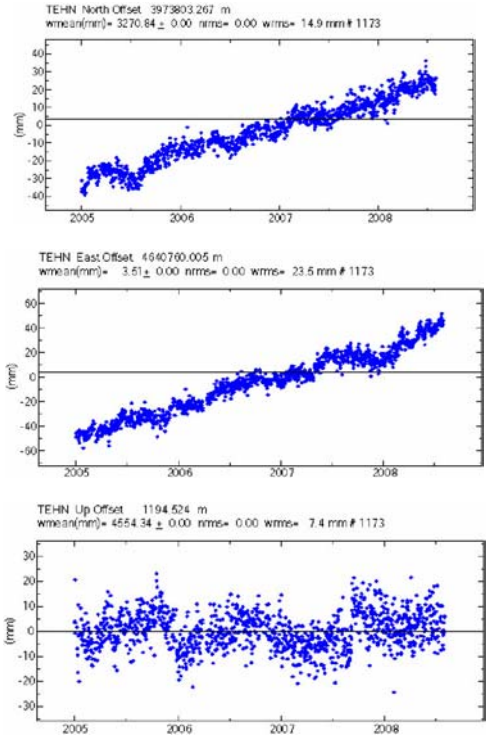
نگاره ۳– سرعت های بدست آمده از داده های GPS در دستگاه مرجع ITRF2000.

به دلیل آن که در تعریف و ایجاد یک چارچوب مرجع از ایستگاههایی که با پوسته زمین حرکت می کنند استفاده می شود، در موقع تبدیل بین چارچوب های مختلف نیز وابستگی پارامترهای تبدیل به زمان باید در نظر گرفته شود. به عبارت ساده تر به جای یک تبدیل معمولی ۷ پارامتری باید با در نظر گرفتن نرخ تغییر آنها از یک تبدیل ۱۴ پارامتری برای انتقال از یک چارچوب به چارچوبی دیگر استفاده شود. توضیحات بیشتر در مورد این انتقال در بخش چارچوب ITRF آورده خواهد شد. موقعیت هر ایستگاه دلخواه در زمان t

منتسب به یک چارچوب ITRF مشخص ($X_{t,ITRF_{yy}}$) با داشتن مختصات و سرعت ایستگاه در زمان t_0 در همان چارچوب ($X_{t_0,ITRF_{yy}}$ و $V_{t_0,ITRF_{yy}}$) از رابطه زیر قابل محاسبه است [7]:

$$X_{t,ITRF_{yy}} = X_{t_0,ITRF_{yy}} + (t-t_0)V_{t_0,ITRF_{yy}} \qquad (۹)$$

با ید توجه نمود در هنگام استفاده از رابطه فوق ضمن اینکه واحدها باید یکسان باشند، فرض می شود که سرعتهای ایستگاه در دو زمان t و t_0 ثابت و در یک چارچوب واحد هستند.



نگاره ۴- نرخ حرکت مولفه های شمالی، شرقی و قائم ایستگاه دائمی GPS تهران در چارچوب ITRF00 به کمک سری های زمانی روزانه از ابتدای ۲۰۰۵ تا اواسط ۲۰۰۸ [8]

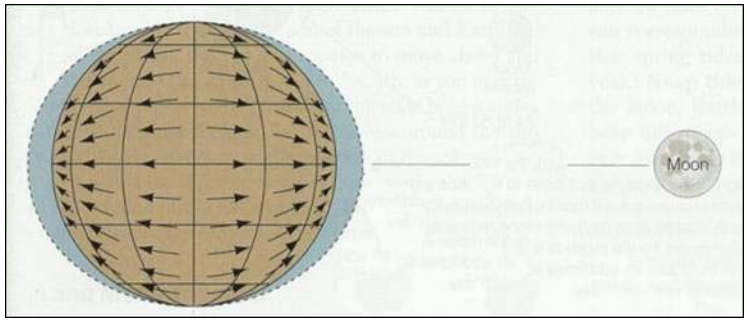
جزر و مد زمین جامد

جزر و مدها به سبب تغییرات زمانی اثر نیروی جاذبه خورشید و ماه بر میدان ثقل زمین، موجب برخی آشفتگی ها در حرکت مداری ماهواره ها می شوند. باید توجه نمود در حالی که جزر و مدهای اقیانوسی به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر خطوط ساحلی و شکل کف اقیانوس ها در سواحل قراردارند، جزر و مدهای زمین

جامد به طور نسبتا دقیقی قابل مدلسازی و پیش بینی می باشند. مک کارتی رابطه ی زیـر را بـرای محاسـبه تصحیح جزر و مدی ارائه کرده است [9]:

$$\Delta x = \sum_{j=2}^{3} \frac{GM_j}{GM_E} \frac{\|r_E\|^4}{\|r_j\|^3} \left\{ h_2 e \left(\frac{3}{2}(r_j.e)^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (r_j.e)[r_j - (r_j.e)e] \right\} \quad (۱۰)$$

که در آن GM_E ثابت جاذبی زمین، GM_j همـین ثابـت بـرای مـاه (j=2) و خورشـید (j=3)، e بـردار واحـد مختصات ایستگاه مشاهده در دستگاه مختصات ژئوسنتریک (x) و r بردار واحد جرم آسمانی می باشد. h_2 و l_2 اعداد لاو و شیدا از درجه اسمی ۲، که خواص کشسانی مدل زمین را توصیف می کنند، می باشـند. رابطـه ی ۵، جزر و مدهای زمین جامد را حداقل با دقت 5mm به دست می دهد.



نگاره ۵- جزر و مد زمین صلب در اثر نیروی جاذبه ماه

تصحیح جزر و مدی می تواند به ۳۰ سانتی‌متر در جهت قائم و ۵ سانتی‌متر در جهت افقـی برسـد [9]. ایـن تصحیح شامل یک جابجائی دائمی وابسته به عرض جغرافیائی و یک بخش تنـاوبی بـا دوره تنـاوب روزانـه و نیمه روزانه است. بخش تناوبی بصورت گسترده‌ای برای تعیین موقعیـت اسـتاتیک روی یـک دوره ۲۴سـاعته متوسط گیری می‌شود. بخش دائمی که می‌تواند به ۱۲سانتی‌متر در عرضهای متوسط برسد در چنین موقعیـت متوسط ۲۴ساعته‌ای باقی می ماند [9]. صرفنظر کردن از تصحیح مـذکور در تعیـین موقعیـت نقطـه ای، بـه ترتیب خطاهای سیستماتیک موقعیت، تا ۱۲/۵و ۵ سانتی‌متر در جهت قائم و شمال را نتیجه می‌دهد [9]. باید متذکر شد که برای تعیین موقعیت تفاضلی بر روی خطوط مبنای کوتاه (کمتر از ۱۰۰ کیلومتر) هر دو ایستگاه

تقریباً جابجائیهای جزر و مدی یکسانی دارند و بنابراین موقعیتهای نسبی بر روی خطوط مبنـای کوتـاه بطـور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر جزر و مد زمین جامد قرار نمی‌گیرند.

بار ناشی از جزر و مد اقیانوسی

بارگذاری اقیانوس اساسا ناشی از چگونگی توزیع آب اقیانوس ها در هنگام جزر و مد می باشد که تابع شـکل کف دریا و اراضی ساحلی است. هنگام بارگذاری اقیانوس، پوسته ی زمـین تحـت وزن آب جـزر و مـد دچـار جابجایی و تغییر شکل عمودی می گردد. جابجایی عمودی پوسته زمین در اثر بار جزر و مد اقیانوسی ممکـن است به چندین سانتی‌متر برای مناطق ساحلی برسد. برای یک خط مبنا با طول ۱۰۰ کیلومتر در جهت دور از ساحل، تأثیر بار جزر و مد اقیانوسی نسبی، ممکن است به ۱ سانتی متر برسد. مـک کـارتی رابطـه ی زیـر را برای مولفه های جابجایی Δc برای یک ایستگاه مشاهده معین (c، مربوط می شود به مولفه های شـعاعی، غربی و جنوبی) در زمان t ارائه کرده است [9]:

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \qquad (۱۱)$$

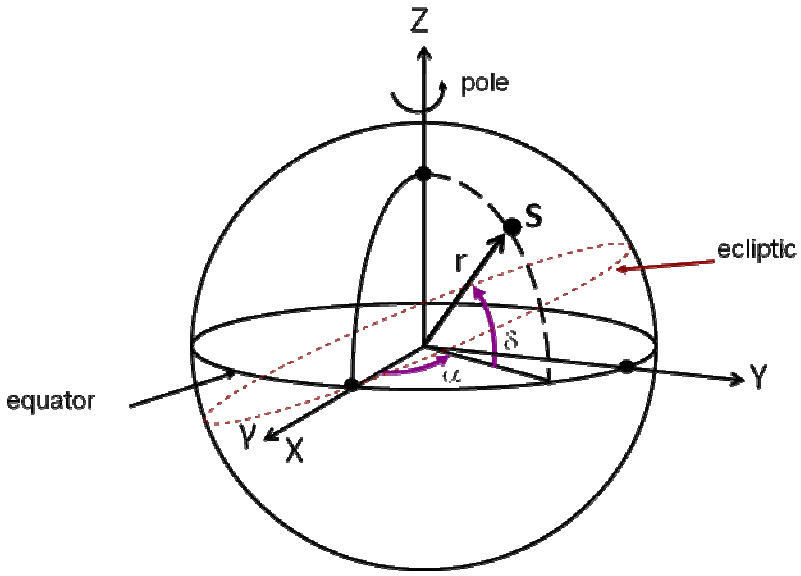
علامت جمع روی j، یازده موج جزر و مدی را با عنـاوین: نیمـه روزانـه شـامل M_2، S_2، N_2 و K_2 و روزانـه شامل K_1، O_1، P_1، Q_1 و دوره ی تناوب طولانی شامل S_a , M_m , M_f نمایش می دهـد. در واقـع بـیش از ۹۵ درصد اثر جزر و مد اقیانوسی بوسیله این ۱۱ مولفه مشخص می‌شود. نمادهـای ω_j و χ_j نـشان دهنـده سرعت های زاویه ای و آرماگون های نجومی در زمان $t=0^h$ می باشد. آرماگون های بنیـادی χ_j مـنعکس کننده ی موقعیت خورشید و ماه می باشند. u_j و f_j تابع طول گره قمری می باشد و در حد دقت ۱-۳ میلی-متر $f_j = 1$ و $u_j = 0$ است. دامنه های ویژه ی ایستگاه A_{cj} و فازهای Φ_{cj} را بـا اسـتفاده از مـدل هـای جزر و مد اقیانوسی و داده های خطوط ساحلی می توان محاسـبه کـرد. ایـن مقـادیر را IERS بـرای بیـشتر ایستگاههای مرجع ITRF فراهم می کند و در دسترس قرار می دهد. تغییر شـکل هـای ناشـی از بارگـذاری M_2 وسیع ترین تغییرشکل می باشد و از ۵ سانتی‌متـر در جهـت قـائم و۲ سـانتی‌متـر در جهـت افقـی بـرای ایستگاه‌های ساحلی فراتر نمی‌رود [9].

دستگاه ها و چارچوب های مرجع سماوی قراردادی (CIRS و CIRF)

قوانین حرکت نیوتن تنها در یک دستگاه مختصات اینرشیال معتبر هستند، یعنی در یک دستگاه مختصات مختصات ساکن یا دستگاه مختصات با حرکت مستقیم الخط یکنواخت. تئوری حرکت ماهواره‌ها بر اساس چنین دستگاه مختصاتی شکل گرفته است.

دستگاه مختصات اینرشیال فضا–چسب معمولاً با اشیاء فرازمینی مانند ستاره‌ها، کوازارها، سیارات یا ماه مرتبط می‌باشد. از اینرو چنین دستگاه مختصاتی را دستگاه مرجع مختصات سماوی (CRS) نیز نامیده‌اند. یک دستگاه مرجع مختصات سماوی بر پایه دینامیک یا کینماتیک استوار است. دستگاه مختصات سماوی کینماتیک بر اساس موقعیت ستاره‌ها یا کوازارها، و دستگاه مختصات دینامیک بر اساس حرکت سیاره‌ها، ماه و یا ماهواره‌ها بیان می‌گردد [1].

دستگاه مختصات استوایی یا بعدی در اپک T0 که سال‌ها در نجوم کروی مورد استفاده بوده است (شکل ۱–۱)، تقریب خوبی از یک دستگاه مرجع مختصات اینرشیال قراردادی است. مبدأ این دستگاه مختصات منطبق بر مرکز زمین، راستای مثبت محور Z در جهت قطب شمال، راستای مثبت محور X به سمت نقطه اعتدال بهاری یا نقطه گاما (γ) و راستای محور Y به گونه‌ای است که دستگاه مختصات دست راستی باشد. با توجه به اینکه مرکز جرم زمین به علت حرکت سالیانه‌اش به دور خورشید، دارای شتاب است، این دستگاه مختصات را شبه اینرشیال می‌گویند [1].



نگاره ۶- دستگاه مختصات استوایی در نجوم کروی [10]

دستگاه ها و چارچوب های مرجع زمینی قراردادی (CTRS و CTRF)

یک سیستم مرجع زمین-چسب بایستی متصل به پوسته زمین باشد. این سیستم زمینی قراردادی (CTS) می‌تواند بر اساس مجموعه‌ای از مختصات‌های کارتزین ایستگاه‌ها یا علائم پایه در یک شبکه جهانی، ایجاد شود [1].

مبدأ یک سیستم مرجع زمینی قراردادی ایده‌آل متصل بر مرکز جرم زمین (به علاوه جرم اقیانوس‌ها و اتمسفر) و محور Z سیستم منطبق بر محور دورانی زمین است. به علت عدم دستیابی به مرکز جرم زمین و محور دورانی آن، تقریبی از آنها در نظر گرفته می‌شود [1]. دستگاه مرجع زمینی قراردادی در طی زمان هیچگونه باقیمانده ای ناشی از چرخش کره نسبت به پوسته زمین ندارد.

تبدیل بین دستگاه های های CIS و CTS :

برای تبدیل مختصات از یک دستگاه مرجع استوایی فضا-چسب (CIS) به یک دستگاه مرجع زمینی قراردادی (CTS) باید سه ماتریس دوران مربوط به پرسشن (P)، نوتیشن (N) و پارامترهای توجیه زمین (S) مطابق رابط زیر اعمال شوند [1].

$$\vec{r}_{CTS} = SNP\vec{r}_{CIS} \qquad (۱۲)$$

رابطه فوق در واقع تبدیل بردار موقعیت دلخواه r از دستگاه اینرشیال قراردادی به دستگاه زمینی قراردادی را نشان می‌دهد.

چارچوب مرجع زمینی بین المللی (ITRF)

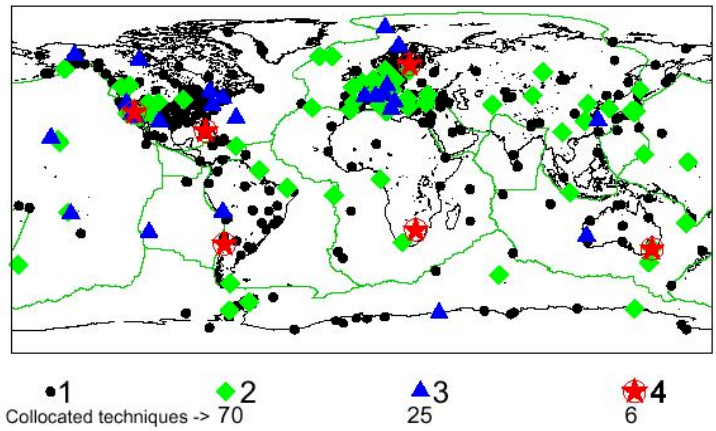
یکی از وظایف اصلی ژئودزی مدرن تعریف و نگهداری یک چارچوب مرجع زمینی بین المللی است. اینکه یک چارچوب مرجع چگونه می‌تواند تحقق پیدا کند، دلالت مهمی بر توانائی ما جهت مطالعه خصوصیات و رفتار جهانی و منطقه‌ای زمین، شامل بازگشت پوسته ای ناشی از دوران یخی، تغییر سطح دریا، تکتونیک صفحه‌ای، فرسایش و بالا آمدگی منطقه‌ای دارد. بنابراین با توجه به اینکه شکل زمین همواره در حال تغییر است باید در بررسی حرکات پوسته زمین از یک چارچوب مرجع زمینی مناسب استفاده شود.

تعریف دستگاه مرجع مختصات قراردادی زمین (CTRS)، به دلیل حرکات تکتونیک ورقه های سنگ کره که موجب تغییر مکان کند ایستگاه مشاهده در طول زمان می گردد، دائماً پیچیده تر می شود. در واقع حرکت ورقه های سنگ کره باعث عدم سازگاری مختصات تثبیت شده ی ایستگاه ها نسبت به یکدیگر می شود. راه حل رفع مشکل مذکور، تعریف یک دستگاه مختصات مرجع با استفاده از مختصات و سرعت یک مجموعه ی سازگار و مستحکمی از یک شبکه ی جهانی از ایستگاهها در یک زمان مشخص می باشد. مرکز جرم زمین یک انتخاب طبیعی برای مبدا مختصات CTRS می باشد، زیرا دینامیک و معادلات حرکت ماهواره ها نسبت به مرکز جرم زمین بیان می شوند. با ملاحظات فوق یک نمونه خاص از CTRS، چارچوب مختصات TRF می باشد که در ایجاد آن مختصات و سرعت ایستگاه ها توما در نظر گرفته می شوند. چارچوب مرجع زمینی (TRF) در واقع مجموعه‌ای از مختصات‌های نقاط زمینی است که جهت ارائه مختصات نقاط، اندازه‌گیری حرکات صفحات تکتونیک، نشست‌ها، بالا آمدگی‌های منطقه‌ای و نیز تعریف حرکات دورانی زمین در فضا استفاده می‌شود. سرویس بین المللی چرخش زمین (IERS) در سال ۱۹۸۸ در ادامه چارچوب مرجع سماوی بین المللی (ICRS)، چارچوب مرجع زمینی بین المللی (ITRF) را تعریف کرد که پارامترهای توجیه زمین این دو چارچوب را بهم متصل می‌کند. با توجه به فراوانی و امکان دسترسی به مشاهدات ژئودزی فضایی و

ماهواره ای نظیر LLR، SLR، VLBI، DORIS و GNSS، چارچوب مرجع زمینی بین المللی به طور پیوسته تحت نظارت IERS به روز می‌شود. از سال ۱۹۸۸ تا کنون ۱۱ نسخه از ITRF معرفی شده است که جدیدترین آنها ITRF2000 وITRF2005 منتسب به سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ هستند. تمامی این نسخه‌ها شامل موقعیت ایستگاه‌ها و سرعت آنها می‌باشد و تغییرات پوسته زمین را مدل‌سازی می‌کنند. به همین جهت است که از آنها می توان در مقایسه مقاطع زمانی مختلف مشاهدات استفاده کرد. تمامی نسخه‌های ITRF توسط پارامترهای انتقال، با حداکثر دقت قابل تبدیل به یکدیگر هستند [11]. در ادامه به معرفی بیشتر دو نسخه جدید ITRF2000 وITRF2005 و تبدیل بین آنها می پردازیم. برای یادآوری یک چارچوب مرجع ITRF یک چارچوب ECEF نیز می باشد.

چارچوب مرجع زمینی بین المللی ITRF2000

چارچوب مرجع زمینی بین المللی ITRF2000 در مارس ۲۰۰۱ ارائه شد. در تعریف این چارچوب از موقعیتها و سرعتهای حدود ۸۰۰ ایستگاه واقع شده در حدود ۵۰۰ مکان بدست آمده از فناوری های مختلف ژئودزی استفاده شد [12].



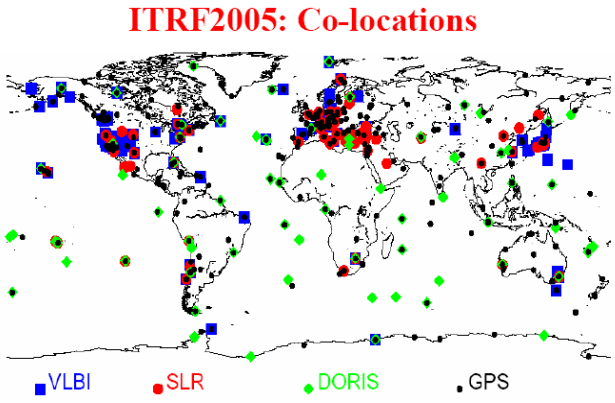
نگاره ۷- موقعیت ایستگاه‌های ITRF2000

مقیاس در ITRF2000 بوسیله ترکیبی از نتایج VLBI و SLR تعیین شده است. توجیه چارچوب ITRF2000 مانند نسخه قبلی خود یعنی ITRF97 در نظر گرفته شده و سرعت توجیه ITRF2000 مطابق مدل تکتونیک زمین‌شناسی NNR-NUVEL-1A تنظیم گردیده است. مبدأ ITRF2000، مرکز جرم زمین با منظور نمودن توزیع جرم زمین صلب، اقیانوسها و اتمسفر تعیین و انتخاب شده است [12].

چارچوب مرجع زمینی بین المللی ITRF2005

برخلاف چارچوب مرجع زمینی بین المللی ITRF2000، داده های مورد استفاده در تعریف ITRF2005، سری های زمانی موقعیتهای ایستگاه ها (حل های هفتگی فناوری های ماهواره ای نظیر SLR، GPS، DORIS و حل های روزانه VLBI) و پارامترهای توجیه زمین به صورت روزانه هستند [11].

مزیت استفاده از سری زمانی مختصات ایستگاهها امکان پایش حرکات غیر خطی و نا پیوستگی‌ها و بررسی رفتارهای زودگذر پارامترهای فیزیکی چارچوب نظیر مبدأ مختصات و مقیاس می‌باشد. مبدأ مختصات ITRF2005 به گونه‌ای تعریف شده است که کمترین نرخ و حرکت را نسبت به مرکز جرم زمین داشته باشد که بوسیله سری زمانی ۱۳ سال مشاهده سامانه SLR بدست آمده است. مقیاس این چارچوب نیز به کمک سری زمانی ۱۲ سال مشاهده سامانه VLBI محاسبه شده است. توجیه این چارچوب مرجع و نرخ آن، مطابق با ITRF2000 و با استفاده از ۷۰ ایستگاه دارای دقت و کیفیت بالا تعیین شده است [11].



نگاره ۸– موقعیت ایستگاه‌های ITRF2005

تبدیل بین چارچوب های مرجع ITRF2000 و ITRF2005

جابجائی‌ها و تغییر موقعیتهائی که در مناطق مختلف کره زمین ایجاد می‌شود، برای اینکه با یکدیگر قابل مقایسه باشند باید در یک چارچوب مرجع زمینی قرار داشته باشند. به همین دلیل بایستی نقش تغییر چارچوب های مبنا نیز بر روی مشاهدات GNSS بررسی شود.

رابطه استاندارد تبدیل بین دو سیستم مرجع سه بعدی یک تشابه اقلیدسی ۷ پارامتری است که عبارتند از: سه مؤلفه انتقال، یک فاکتور مقیاس و سه زاویه دوران که به ترتیب عبارتند از : $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$. از آنجا که سرعت و نرخ تغییرات زمانی این پارامترها نیز در چارچوب های مرجع زمینی باید مد نظر قرار گیرد ۷ پارامتر دیگر یعنی مشتقات مرتبه اول زمانی آنها در این تبدیل استفاده می شوند که عبارتند از: $\dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3, \dot{D}, \dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$. تبدیل بردار مختصات X_1 در چارچوب مرجع ITRF2000 به بردار مختصات X_2 در چارچوب مرجع ITRF2005 با معادله زیر نشان داده می‌شود [11]:

$$X_2 = X_1 + T + DX_1 + RX_1 \qquad (۱۳)$$

که در آن :

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{pmatrix}$$

با این فرض که معادله فوق برای مجموعه مختصات های ایستگاه های مورد استفاده، خطی است (تفاوت مبدأ حدود چند صد متر و تفاوت مقیاس و توجیه از درجه 10^{-5} است)، معادله تفاضلی آن نسبت به زمان به صورت زیر بیان می‌شود [11]:

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + D\dot{X}_1 + \dot{R}X_1 + R\dot{X}_1 \qquad (۱۴)$$

از آنجا که D, R از مرتبه 10^{-5} و $\dot{X}$ حداکثر ۱۰ سانتی‌متر در سال است، عبارات $D\dot{X}_1$ و $R\dot{X}_1$ بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن هستند. بنابراین معادله فوق را می‌توان بصورت زیر نوشت[11]:

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \qquad (۱۵)$$

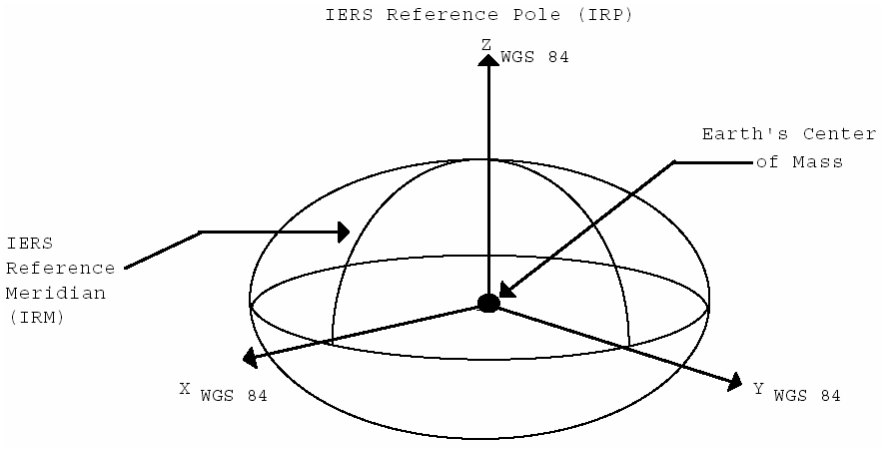
بر اساس روابط ارائه شده، پارامترهای تبدیل بین ITRF2000 و ITRF2005 محاسبه و طبق جدول زیـر در سایت ITRF قرار داده شده است.

جدول۲- پارامترهای تبدیل بین ITRF2000 و ITRF2005 [13]

	T1 mm	T2 mm	T3 mm	D 10-9	R1 mas	R2 mas	R3 mas
	0.1	-0.8	-5.8	0.40	0.000	0.000	0.000
+/-	0.3	0.3	0.3	0.05	0.012	0.012	0.012
Rates	-0.2	0.1	-1.8	0.08	0.000	0.000	0.000
+/-	0.3	0.3	0.3	0.05	0.012	0.012	0.012

سطح مبنای ژئودتیک در GPS [بیضوی مرجع]

امروزه هر یک از سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای برای ارائه مختصات ایستگاه های مورد اندازه گیـری از یک دستگاه مختصات مرجع زمینی قراردادی کارتزین و بیضوی دو محوره دورانی مربوط به خـود اسـتفاده می کنند که به یکدیگر نزدیک هستند. شناخته شده ترین آنها دسـتگاه مختـصات زمینـی و بیـضوی مرجـع WGS-84 مورد استفاده در سامانه GPS است. این دستگاه در واقع از نوع CTRS اسـت کـه بنـابر تعریـف زمین مرکز و زمین چسب می باشد و محور z آن از قطب قراردادی زمـین (CTP) نـسخه مربـوط بـه سـال ۱۹۸۴با دقت $\pm 0.005''$ می گذرد. محور x آن فصل مشترک نصف النهار گرینویچ و صفحه استوای تعریـف شده در سال ۱۹۸۴ با دقت $\pm 0.005''$ می باشد و محور y آن نیز به گونه ای تعریف شـده اسـت کـه یـک دستگاه مختصات سه بعدی دست راستی بدست آید [14].



نگاره ۹- تعریف دستگاه مختصات WGS 84

چهار پارامتر اصلی هندسی و فیزیکی مربوط به بیضوی WGS-84 نیز به شرح زیر تعیین و معرفی شده اند [14].

Parameter	Notation	Value
Semi-major Axis	a	6378137.0 meters
Reciprocal of Flattening	1/f	298.257223563
Angular Velocity of the Earth	ω	$7292115.0 \times 10^{-11}$ rad/s
Earth's Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Included)	GM	$3986004.418 \times 10^{8} m^3/s^2$

همانطور که می دانیم به سادگی می توان مختصات ژئودتیک (φ, λ, h) هر نقطه دلخواه را در دستگاه WGS-84 به مختصات کارتزین (x, y, z) و بر عکس تبدیل نمود. رابطه کلی تبدیل مختصات ژئودتیک به مختصات کارتزین به صورت زیر می باشد [15].

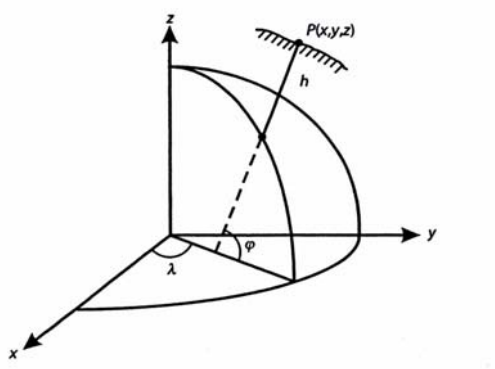
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ (N(1-e^2)+h)\sin\varphi \end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

همچنین رابطه کلی تبدیل مختصات کارتزین به مختصات ژئودتیک به صورت زیر ارائه می شود [15].

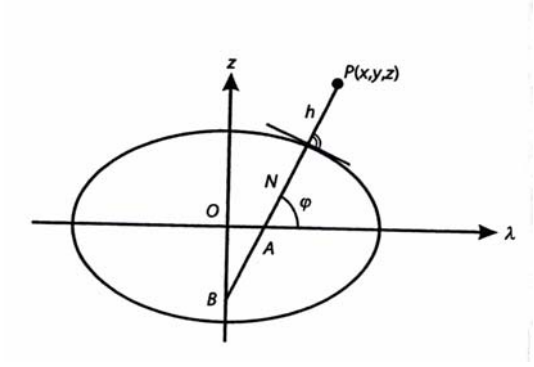
$$\begin{cases} \tan\varphi = \dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2}}\left(1-e^2\dfrac{N}{N+h}\right)^{-1} \\ \tan\lambda = y/x \\ h = \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}}{\cos\varphi} - N \end{cases} \qquad (۱۷)$$

در روابط فوق e خروج از مرکزیت اول و N شعاع انحنای قائم اولیه است که از رابطه زیر بدست می آید.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}}$$



نگاره ۱۰- الف- مختصات ژئودتیک (φ,λ,h) و کارتزین (x,y,z)



نگاره ۱۰- ب- شعاع انحنای قائم اولیه (N)

البته تبدیل مختصات کارتزین به مختصات ژئودتیک به صراحت و سادگی تبدیل مختصات ژئودتیک به مختصات کارتزین نیست. همانطور که مشاهده می شود در تبدیل مختصات کارتزین به مختصات ژئودتیک نیاز به φ و h می باشد که خود مجهول هستند. لذا برای دستیابی به مختصات ژئودتیک نهایی باید از یک حل تکراری که با مقادیر تقریبی φ و h شروع می شود، استفاده نمود. از آنجا که $h << N$ مراحل تکرار به سرعت انجام و همگرا می‌شود. استفاده از روابط زیر می تواند شروع مناسبی برای تکرارهای بعدی باشد [15].

$$e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}$$

$$\cot\varphi = \sqrt{\frac{x^2+y^2}{z+\Delta z}}\ , \qquad \Delta Z = e^2 N\sin\varphi = \frac{a\,e^2\sin\varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}}$$

$$h = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + \Delta z)^2} - N$$

تبدیل بین دو بیضوی مرجع

هرچند در اغلب موارد اختلاف بین مختصات نقاط در دو دستگاه مرجع قراردادی زمینی بسیار کوچک است، لیکن در برخی کاربردها تبدیل مختصات کارتزین و ژئودتیک منتسب به یک بیضوی به یک بیضوی دیگر ضروری است. از این رو در ادامه به شرح و چگونگی این تبدیلات پرداخته می شود. برای دو دستگاه مختصات کارتزین که در مبدا و واحد طول اختلاف دارند به طور معمول از رابطه تبدیل ۷ پارامتری زیر معروف به تبدیل هلمرت استفاده می شود [16].

$$X_2 = X_0 + \mu R X_1 \qquad (۱۸)$$

یا

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \mu R \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \qquad (۱۹)$$

که در آن μ ضریب مقیاس (نسبت واحد های طول در دو دستگاه مختصات)، X_0 بردار انتقال (اختلاف مختصات در مبدا دو دستگاه مختصات)، X_1 بردار مختصات در دستگاه اول، X_2 بردار مختصات در دستگاه دوم و R ماتریس دوران های جزیی α_x ، α_y و α_z حول محور های x، y و z به صورت زیر است.

$$R = R_x(\alpha)R_y(\alpha)R_z(\alpha) \cong \begin{bmatrix} 1 & \alpha_z & -\alpha_y \\ -\alpha_z & 1 & \alpha_x \\ \alpha_y & -\alpha_x & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_z(\alpha)=\begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

تبدیل مختصات ژئودتیک از یک بیضوی ($G1$) به یک بیضوی دیگر ($G2$) نیز به صورت زیر قابل بیان می باشد.

$$\begin{aligned}\varphi_{G2}&=\varphi_{G1}+\Delta\varphi\\ \lambda_{G2}&=\lambda_{G1}+\Delta\lambda\\ h_{G2}&=h_{G1}+\Delta h\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

با استفاده از فرمول های استاندارد Molodensky می توان مقادیر $\Delta\varphi$، $\Delta\lambda$ و Δh را بر حسب ثانیه کمانی و متر به ترتیب زیر بدست آورد [14].

$$\begin{aligned}\Delta\phi'' = \{&-\Delta X\sin\phi\cos\lambda - \Delta Y\sin\phi\sin\lambda + \Delta Z\cos\phi + \Delta a\,(R_N e^2\sin\phi\cos\phi)/a\\ &+ \Delta f\,[R_M(a/b)+R_N(b/a)]\sin\phi\cos\phi\}\bullet[(R_M+h)\sin 1'']^{-1}\\ \Delta\lambda'' = {}&[-\Delta X\sin\lambda + \Delta Y\cos\lambda]\bullet[(R_N+h)\cos\phi\sin 1'']^{-1}\\ \Delta h = {}&\Delta X\cos\phi\cos\lambda + \Delta Y\cos\phi\sin\lambda + \Delta Z\sin\phi - \Delta a\,(a/R_N) + \Delta f\,(b/a)R_N\sin^2\phi\end{aligned} \qquad (۲۱)$$

که در آن:

(φ,λ,h) مختصات ژئودتیک در بیضوی $G1$،

$(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z)$ اختلاف مختصات در مرکز دو بیضوی،

a، b و f، e به ترتیب نیم قطر بزرگ، نیم قطر کوچک، فشردگی و خروج از مرکزیت اول بیضوی $G1$،

Δa و Δb به ترتیب اختلاف نیم قطر بزرگ و فشردگی در بیضوی های $G1$ و $G2$،

R_N شعاع انحنای قائم اولیه،

$$R_N = a/\left(1-e^2\sin^2\varphi\right)^{1/2}$$

و R_M شعاع انحنای نصف النهاری است.

$$R_M = a\left(1-e^2\right)/\left(1-e^2\sin^2\varphi\right)^{3/2}$$

تبدیل بین WGS-84 و ITRF2000 در ایران

یکی از مشکلاتی که کابران شبکه ایستگاه های دائم GPS ایران، موسوم به شبکه ژئودینامیک سراسری، در بخش مهندسی و طرح های عمرانی با آن مواجه بودند، عدم همخوانی مختصات ITRF2000 این ایستگاه ها با مختصات WGS-84 بود. هر چند این اختلافات از چند سانتی متر تجاوز نمی کرد ولی برای رفع نگرانی های موجود تصمیم گرفته شد تا ضرایب تبدیل بین این دو دستگاه مختصات محاسبه و در اختیار کاربران قرار گیرند. بر همین اساس توسط یک کار مشترک در سازمان نقشه برداری کشور ضرایب تبدیل مختصات کارتزین از ITRF2000 به WGS-84 محاسبه و انتشار یافت [17]. این ضرایب با دقت بسیار بالایی بر اساس مدل تبدیل استاندارد ۷ پارامتری Bursa-Wolf (Bursa, 1962; Wolf, 1963) و استفاده از ۲۶ ایستگاه مشترک در دو دستگاه مختصات (با توزیع سراسری در ایران) مطابق جدول ۳ بدست آمدند.

جدول۳- ضرایب تبدیل ITRF2000 به WGS-84 در ایران [17]

❑ Shift dX	0.551	0.0028	m
❑ Shift dY	-0.373	0.0028	m
❑ Shift dZ	-0.817	0.0028	m
❑ Rotation about X	-0.001063	0.0013	["]
❑ Rotation about Y	0.009047	0.0016	["]
❑ Rotation about Z	-0.011414	0.0014	["]
❑ Scale	0.004874	0.0050	[ppm]

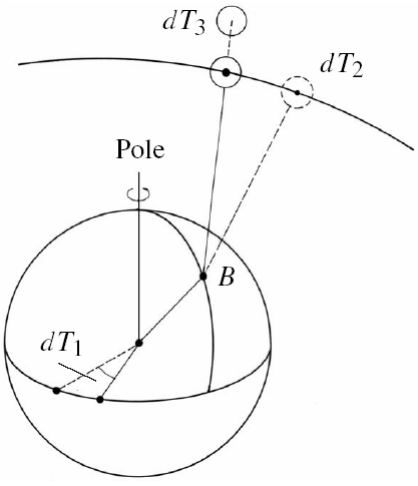
دستگاه های مرجع زمان

هدف اصلی دستگاه های مرجع زمان، تعیین لحظه دقیق یک رویداد است. در مکانیک سماوی و ژئودزی ماهواره ای، زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا اجرام سماوی و ماهواره ها با سرعت بسیار زیادی حرکت می‌کنند. برای داشتن یک دستگاه مرجع زمان به صورت عملی، نیاز به یک بازه زمانی قابل تکرار و دقیق است که بر پایه برخی پدیده‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری، استوار باشد. همچنین یک مقطع زمانی

مرجع لازم است تا بازه‌های زمانی نسبت به آن محاسبه شوند. مقطع زمانی مرجع متداول در محاسبات نجومی و ماهواره ای، روز میلاد مسیح است [18].

در حال حاضر سه مقیاس زمانی در ژئودزی ماهواره ای مورد بحث می باشند که عبارتند از: زمان نجومی و خورشیدی، زمان دینامیکی و زمان اتمی. این زمان ها به ترتیب به دلیل ارتباط مشاهدات زمینی به یک چارچوب فضا–چسب، تبیین حرکات مداری ماهواره ها و اندازه گیری دقیق زمان ارسال و دریافت امواج مورد نیاز می باشند. زمان نجومی و زمان خورشیدی بر پایه دوران زمین تعریف شده اند و ارتباط آن‌ها بوسیله روابط ریاضی مشخص می باشد، در حالیکه زمان دینامیکی و زمان اتمی مستقل از دوران زمین می‌باشند.

به منظور دستیابی به دقت های مورد نظر سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای، می بایست ارتباط بین دستگاه های مختلف زمانی با بالاترین دقت مشخص باشد. برای مثال دقت زمانی متناظر با خطای ۱ سانتی متر در موقعیت، با در در نظر گرفتن یک نقطه در استوا و دوران زمین $dT_1 = 2\times10^{-5}s$، یک ماهواره نزدیک به سطح زمین در مدار خود $dT_2 = 1\times10^{-6}s$ و یک فاصله بدست آمده از مدت زمان طی شده توسط یک سیگنال از ماهواره تا ایستگاه زمینی $dT_3 = 1\times10^{-10}s$ است [1]. بنابراین با توجه به دقت های زمانی ارائه شده در می یابیم که دستگاه های مرجع زمان مربوط به هر یک باید از دقتی بالاتر برخوردار باشند.



نگاره ۱۱– اثر خطاهای زمان سنجی در ژئودزی ماهواره ای [1]

زمان های مبتنی بر دوران زمین

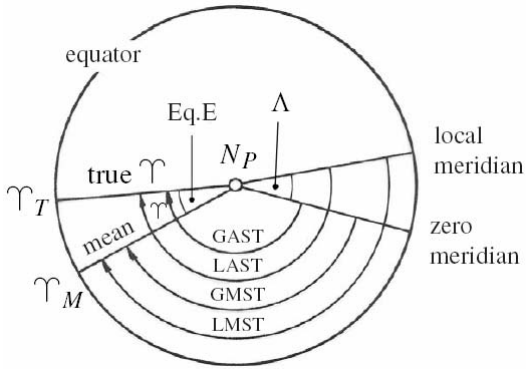
- **زمان نجومی**

حرکت روزانه زمین نسبت به ستاره‌ها و خورشید، به ترتیب مبنای زمان نجومی و زمان خورشیدی است. یک روز خورشیدی فاصله زمانی میان دو گذر متوالی خورشید از نصف‌النهار محل و یک روز نجومی فاصله زمانی میان دو گذر متوالی یک ستاره از نصف‌النهار محل است. به دلیل حرکت سالیانه زمین به دور خورشید طول روز خورشیدی و روز نجومی یکسان نمی‌باشد و در واقع یک روز در سال با هم اختلاف دارند.

اگر زاویه ساعتی نقطه اعتدال بهاری نسبت به نصف‌النهار نجومی گرینویچ اندازه گیری شود، زمان نجومی ظاهری گرینویچ (GAST) یا زمان نجومی متوسط گرینویچ (GMST) بدست می آید که تفاوت آنها در اختلاف بین نقطه اعتدال بهاری حقیقی و نقطه اعتدال بهاری متوسط می باشد. به همین ترتیب اگر زاویه ساعتی نقطه اعتدال بهاری نسبت به نصف‌النهار نجومی محلی اندازه گیری شود، زمان نجومی ظاهری محلی (LAST) یا زمان نجومی متوسط محلی (LMST) بدست می آید که مجددا تفاوت آنها در اختلاف بین نقطه اعتدال بهاری حقیقی و نقطه اعتدال بهاری متوسط می باشد. روابط بین این زمان ها به صورت زیر قابل بیان می باشد [10].

$$GMST - GAST = \Delta\psi \cos\varepsilon \qquad (۲۲)$$

$$LMST - GMST = LAST - GAST = \Lambda \qquad (۲۳)$$



نگاره ۱۲- تعریف و ارتباط بین انواع زمان های نجومی [1]