

معرفی روش مدل سازی تغییرات گرانی زمین با استفاده از مدل اتساعی تلفیقی در پروسه رخداد زلزله

علیرضا حاجیان، استادیار گروه فیزیک، دانشکده مهندسی هسته‌ای و علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد،
E-mail: a.hajian@iaun.ac.ir

چکیده: یکی از تغییراتی که اخیراً در مراحل مختلف پروسه‌های لرزه‌ای اعم از پیش‌لرزه، لرزه اصلی و پس‌لرزه مورد توجه قرار گرفته، تغییرات گرانی زمین است. بررسی این تغییرات گرانی که البته دامنه‌ای نسبتاً وسیع نسبت به شوک اصلی ممکن است رخ داده باشد، می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر تکمیلی در کنار سایر پیش‌نشانگرهای زلزله مورد استفاده قرار گرفته و احتمال صحت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. مدل سازی تغییرات گرانی در یک پروسه لرزه‌ای می‌تواند کمک شایان توجهی به وارون سازی تغییرات گرانی به‌منظور پیش‌یابی لرزه‌ای بنماید. در این راستا بایستی مدلی انتخاب شود که بتوان در این مدل هم شرایط مکانی و پیکربندی هندسی زلزله را در نظر گرفت و هم بتوان این مدل را برای فازهای مختلف زلزله در بازه‌های زمانی مفروض مورد بررسی قرار داد. یکی از مناسب‌ترین مدل‌ها که این ویژگی‌ها را در بر داشته باشد مدل اتساع تلفیقی است که در این مقاله به معرفی این مدل و توانایی‌های آن پرداخته شده است.

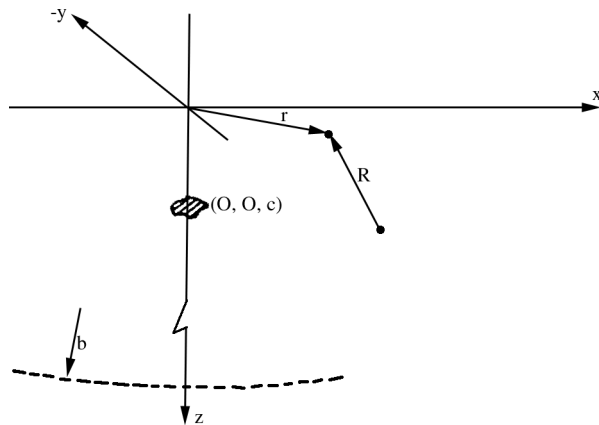
کلیدواژه‌ها: تغییرات گرانی، مدل سازی، اتساعی تلفیقی، پیش‌نشانگر زلزله

۱- مقدمه

تغییر در مقدار گرانی زمین، در اثر مهاجرت جرم، نفوذ سیالات در حفرات زیرزمینی و آغاز ریزشکست‌ها است. البته تغییرات ارتفاعی کوچکی که در فاز پیش‌لرزه‌ای وجود دارد نیز باعث تغییرات گرانی به‌خصوص در فاصله‌های نزدیک به چشمه لرزه‌ای می‌گردد که با افزایش عمق چشمه لرزه‌ای اثر ارتفاعی آن کمتر بر روی سیگنال گرانی قابل مشاهده است. همچنین در سال‌های اخیر اثرات تغییرات منطقه‌ای گرانش و چگالی بر گوشته زمین ناشی از جریان‌های همرفتی که منشأ بسیاری از زلزله‌ها می‌باشد، ارائه شده است [۲].

شایان‌ذکر است که علت اصلی تغییرات گرانی در پروسه وقوع زلزله‌ها، بیشتر جابه‌جایی جرم، تغییرات حجمی و نیز تغییرات احتمالی ارتفاع در نقاط نزدیک به مرکز زلزله است [۳]. در این راستا، به منظور مدل کردن تغییرات گرانی

به هر پارامتری که قبل از وقوع زمین‌لرزه تغییراتی در آن پدید آید، به‌گونه‌ای که با بررسی دقیق تغییرات بتوان زمین‌لرزه را پیش‌بینی نمود، پیش‌نشانگر گفته می‌شود. تاکنون بیش از ۳۰ پیش‌نشانگر مختلف زمین‌لرزه شناسایی شده‌اند؛ اما با این که ارتباط بسیاری از این پیش‌نشانگرها با زلزله مشخص شده، ولی مدل سازی‌های واقع‌گرای کمتری در این زمینه ارائه شده است. در این میان می‌توان تغییر در پتانسیل گرانی زمین را به‌عنوان یکی از پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه معرفی کرد. یا به عبارتی از تغییر چگالی و تغییرات ارتفاع پوسته ناشی از زلزله به تغییرات گرانی رسید، که با اندازه‌گیری دوره‌ای گرانی توسط دستگاه‌های دقیق امروزی با دقت میکروگال در چند ایستگاه می‌توان به این تغییرات ارتفاعی و در پی آن به تغییرات گرانی پی برد [۱].

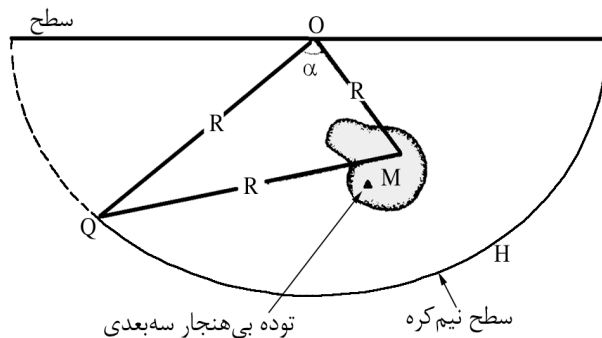


شکل (۱): سیستم مختصات در بررسی تغییرات گرانی.

چشمه بسیار بزرگتر است. در شکل (۱) چشمه در عمق c قرار دارد. اگر تغییرات گرانی در اثر تغییر حجم ΔV به اندازه Δg در نظر گرفته شود رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$-\int_{S_0} \Delta g ds - 2\pi G\rho \Delta V = -4\pi G\rho \Delta V \quad (1)$$

که در آن ds المان سطح و dv المان حجم جرم مربوطه است. بنابراین انتگرال آنومالی گرانی روی سطح، به افزایش حجم در نیم‌فضا بستگی دارد، شکل (۲).



شکل (۲): محاسبه اضافه جرم.

مسئله اخیر شباهت زیادی با محاسبه مرکز جرم جسم دفن شده دارد. اگر مختصات \bar{y} و \bar{x} مختصات مرکز گرانی تغییر حجم ΔV باشد، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$2\pi G\rho \bar{x} \Delta V = \int_{S_0} x \Delta g ds \quad (2)$$

$$2\pi G\rho \bar{y} \Delta V = \int_{S_0} y \Delta g ds$$

ناشی از زلزله در سه مرحله قبل، همزمان و بعد از لرزه اصلی از روش‌های مختلفی استفاده شده است. یکی از روش‌های بررسی مکانیسم زمین‌لرزه در تغییر گرانی زمین مدل‌های اتساعی تلفیقی (combined dilatancy model) است. اتساع‌های ناشی از دگرشکلی، ریزشکست‌ها (micro fracture) و آرامش استرسی (stress relaxation) که با نفوذ یا عدم نفوذ سیال، تغییرات چگالی، پیکربندی هندسی در فضا و تخلخل همراه می‌شوند، در این مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. بنابراین انتظار می‌رود که گرانی مشاهده‌شده پاسخ یکسری اتفاقات زنجیره‌ای از دگرشکلی پوسته باشد. در واقع در روش تلفیقی حاضر از این عوامل در مدل تغییرات گرانی کلی که در یک پروسه لرزه‌ای کامل به وقوع می‌پیوندد، در نظر گرفته می‌شود؛ لذا می‌تواند با واقعیت تطبیق بهتری داشته باشد.

در مقاله حاضر، این مدل و روابط حاکم بر آن در فازهای

مختلف لرزه‌ای به همراه مثالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روابط اولیه مدل‌سازی تغییرات گرانی ناشی از زلزله

۲-۱- معادلات و روابط حاکم

برای بررسی آنومالی گرانی که بر اثر تغییر شکل پوسته حاصل از فعالیت‌های لرزه‌ای به وجود آمده، فرض می‌شود نقطه مرجع (چشمه) در فضا ثابت و جرم سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین منطقه شکست نسبت به زمین آن‌قدر کوچک است که بتوان از تقریب نیم‌فضا استفاده نمود. در این حالت، جهت مثبت Z را به سوی عمق و چگالی را همگن در نظر می‌گیرند. در این آنالیز به رفتارهای ساختاری مواد موجود اهمیتی داده نشده و اعتقاد بر این است که روش مورد استفاده را می‌توان برای تمام مواد از جمله الاستیک یا پلاستیک یا ویسکوز به کار برد، شکل (۱).

در این سیستم زمین به صورت نیم‌فضا فرض شده است. برداری است از نقطه‌ای اختیاری به نقطه‌ای مرجع در سطح $Z = 0$ که فاصله این نقطه تا مبدأ مختصات r است. خط نقطه‌چین نیم‌کره‌ای به شعاع b که از عمق و اندازه

۲-۲- تصحیح هوای آزاد و اثر شارش سیال

برای تصحیح هوای آزاد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta g_{FA} = -\left(\frac{8}{3}\pi\right)G\rho_E h \quad (3)$$

که ρ_E متوسط چگالی زمین است (۲۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب).

اثر گرانی ناشی از نفوذ یا خروج سیال به داخل

حفره‌های متسع شده با Δg_F نشان داده می‌شود:

$$\Delta g_F = G\rho_F \int_{S_C} (\vec{n}\cdot\vec{u}_F)(Z/R^3) dS \quad (4)$$

که $\rho_F(\vec{n}\cdot\vec{u}_F)$ جرم سیال شارش پیدا کرده بر سطح یک حفره است. برای به دست آوردن اثر دگرشکلی بر روی گرانی باید معادله (۴) به معادله (۵) اضافه شود.

$$\Delta g/G = 2\pi h(\rho - \frac{4}{3}\rho_E) + \quad (5)$$

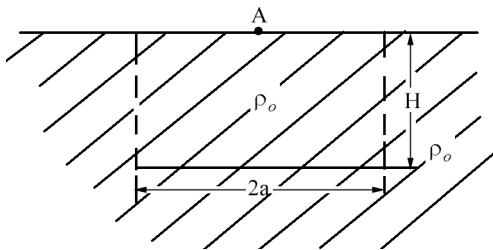
$$\int_{S_C} \vec{n}\cdot(P\vec{u} + P_F\vec{u}_F)(t/R^3) dS$$

که $\vec{n}\cdot\vec{u}$ منفی است اگر حفرات اتساع ایجاد شود و $\vec{n}\cdot\vec{u}_F$ مثبت است اگر سیالات به داخل شارش راه یابند.

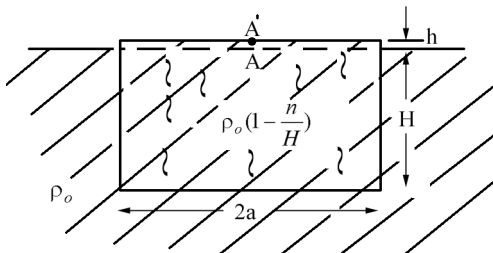
۳- بررسی ابتدایی تغییرات گرانی به کمک اثر گرانی یک استوانه فرضی

در این بخش، ابتدا یک استوانه فرضی در نظر گرفته می‌شود. سپس سه عامل ذکر شده در بخش قبل روی استوانه اعمال نموده و تغییر گرانی حاصل به‌طور تئوریک محاسبه می‌شود.

برای شروع، استوانه‌ای به شعاع a و ارتفاع H که سطح فوقانی آن بر سطح زمین منطبق و سطح پایین آن ثابت است در نظر گرفته می‌شود. بر اثر پروسه لرزه‌ای شکل اولیه استوانه تغییر و درزهای داخلی اتساع نموده، در نتیجه استوانه به اندازه h بالا می‌آید. با توجه به این نکته که حجم اولیه استوانه برابر است با $V = \pi a^2 H$ ؛ بنابراین کرنش حجمی برابر است با $\frac{\Delta V}{V} = \frac{h}{H}$ ، شکل (۳). استرین حجمی از مرتبه 10^{-6} است. به این معنی که اگر a و H در حدود یک کیلومتر در نظر گرفته شود، آنگاه h در حدود یک میلی‌متر است.



شکل (الف) قبل از اتساع



شکل (ب) بعد از اتساع

شکل (۳): نمای کناری استوانه قبل و بعد از اتساع.

اگر جرم استوانه m_0 فرض شود، در نتیجه چگالی قبل از اتساع برابر $\rho = \frac{m}{V}$ خواهد بود؛ بنابراین چگالی بعد از اتساع برابر است با:

$$\rho = \frac{m_0}{V} = \frac{m_0}{V_0\left(1 + \frac{h}{H}\right)} = \rho_0 \left(1 - \frac{h}{H}\right) \quad (6)$$

آنگاه تغییر چگالی برابر است با:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = -\frac{h}{H}\rho_0 \quad (7)$$

در شکل (۳)، رومرکز A بعد از اتساع تا نقطه A' بالا می‌آید. در این هنگام گرانی در نقطه A' از جمع دو قسمت که در شکل (۴) نشان داده شده حاصل می‌شود. در شکل (۴-الف) قسمت اول این گرانی را نشان می‌دهد که از بالا آمدن h با چگالی ثابت تأمین می‌شود (استوانه به شعاع a ، ارتفاع h و چگالی ρ). شکل (۴-ب) قسمت دوم گرانی یک استوانه به شعاع a ، ارتفاع $(h+H)$ و چگالی $(-\rho\frac{h}{H})$ را نشان می‌دهد. جمع این دو قسمت گرانی نقطه است. شکل (۴-الف) را می‌توان به دو قسمت a_1 و a_2 تقسیم کرد که قسمت a_1 نشان‌دهنده هوای آزاد است و برای نشان دادن اثر هوای آزاد از رابطه (۸) استفاده می‌شود:

در معادلات بالا از تخمین $h \ll a$ و $h \ll H$ استفاده شده است؛ بنابراین برای نشان دادن اثر عواملی چون تغییرات ارتفاع و انبساط حجمی روی گرانی باید دو عبارت g_a و g_b با هم جمع شوند:

$$\delta g_D = -2\pi G \left[\frac{4}{3} \rho_E - \rho_0 \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{H^2}} - \frac{a}{H} \right) \right] h \quad (13)$$

معادله (۱۳) نشان می‌دهد که اثر گرانی δg_D بین اثر هوای آزاد $\delta g_{a_1} = 0.308h$ و اثر بوگه $\delta g_{a_2} = 0.196h$ قرار دارد.

در این قسمت اثرات حاصل از مهاجرت و پر شدن منافذ و درزه‌های موجود در سیال، بر روی گرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت نیز دوباره استوانه بالا فرض می‌شود. در سنگ‌های پوسته منفذها و حفراتی وجود دارد و ممکن است بر اثر فعالیت‌های لرزه‌ای این درزه‌ها و حفرات از نظر تعداد افزایش و یا از نظر حجم پیشرفت کنند (تخلخل در سنگ‌های پوسته در بین 10^{-4} تا 10^{-6} درصد نوسان دارد). تغییرات حجم ناشی از اتساع شکاف‌ها از مرتبه 10^{-6} است، یعنی $\frac{V}{V_0} \approx 10^{-6}$ ؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت حجم شکاف‌های به وجود آمده به مراتب کم‌تر از حجم شکاف‌هایی که قبلاً وجود داشته، است. اگر تخلخل جسم موجود در استوانه φ در نظر گرفته شود و α کسری از تخلخل که

$$\delta g_{a_1} = \frac{8}{3} \pi G \rho_E h \quad (8)$$

که ثابت جهانی گرانی و $\rho_E = 5.5 \frac{g}{cm^3}$ چگالی زمین است که با جاگذاری آن‌ها در رابطه (۸)، رابطه (۹) حاصل می‌شود:

$$\delta g_{a_1} = -0.3083h \quad (9)$$

قسمت (۲ا) نشان‌دهنده اثر گرانی مرکزی بر بالای استوانه با ضخامت h شعاع a و چگالی ρ است.

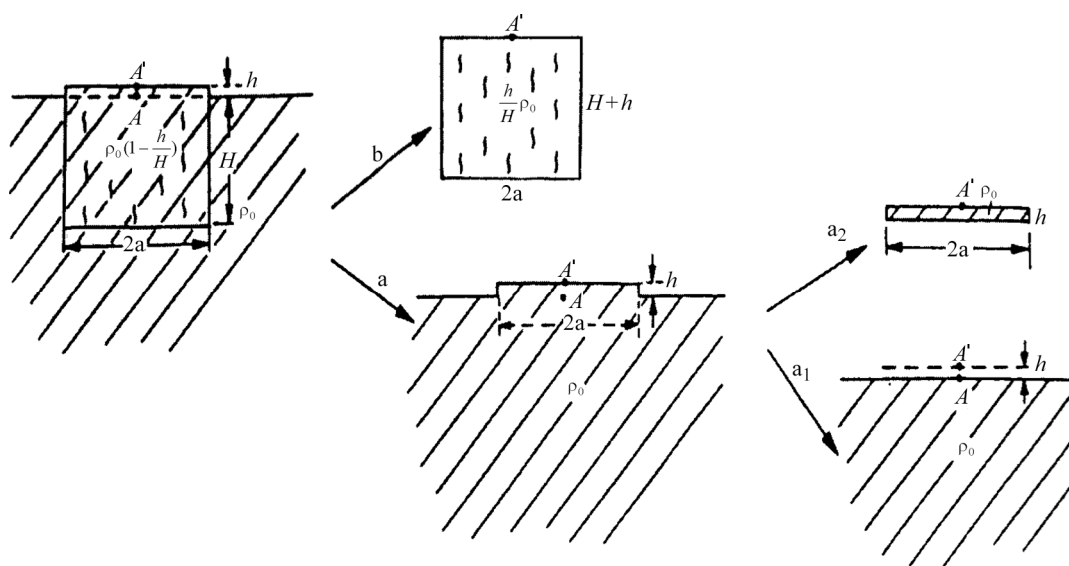
$$\delta g_{a_1} = 2\pi G \rho_0 \left[h - \sqrt{a^2 + h^2} + a \right] = 2\pi G \rho_0 h \quad (10)$$

که در معادله فوق $\rho_0 = 2.67 \frac{g}{cm^3}$ است؛ بنابراین در شکل (۴-الف) مجموع گرانی برابر است با:

$$\delta g_{a_1} = \delta g_1 + \delta g_2 = -\frac{8}{3} \pi G \rho_E h + 2\pi G \rho_0 h \quad (11)$$

در شکل (۴-ب)، اثر گرانی مرکزی است که در بالای یک استوانه به شعاع a ارتفاع $(H+h)$ و چگالی $(-\rho \frac{h}{H})$ است؛ بنابراین طبق رابطه (۱۲):

$$\begin{aligned} \delta g_{a_1} &= 2\pi G \left(-\frac{h}{H} \rho_0 \right) \times \\ &\left[(H+h) - \sqrt{a^2 + (H+h)^2} + a \right] \\ &= 2\pi G \rho_0 \left[1 - \sqrt{1 + \frac{a^2}{H^2}} + \frac{a}{H} \right] h \end{aligned} \quad (12)$$



شکل (۴): مدل در نظر گرفته‌شده برای محاسبه اثر گرانی استوانه اتساع یافته.

تا حد زیادی رفع کرد. برای حذف Ge از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود.

$$G_e(\mu gals) = (3.086 - 0.419\rho)\delta H \quad (17)$$

که همان تصحیح هوای آزاد به علاوه تصحیح بوگه است. برای Gg که همان اثر آب‌های زیرزمینی است رابطه زیر به کار می‌رود:

$$G_g(\mu gals) = 0.42E^*(D\delta W)_{(cm)}$$

در رابطه فوق، δW تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به‌عنوان تابعی از زمان، تابع ورودی رطوبت و E تابع نمایشی از زمان و $E \times (D\delta W)$ دیکانولوشن دو تابع E و $D\delta W$ است [۸]؛ بنابراین:

$$\begin{aligned} G_s &= G - GN \\ GN &= Gt + Tn + Ge + Gg \end{aligned} \quad (18)$$

که تمام فاکتورها قابل محاسبه است. در این مدل، تغییرات گرانی تابعی از چهار فاکتور می‌باشد که عبارتند از: چگالی ρ ، پیکربندی هندسی G ، تخلخل و ریزدرزها ϕ و مقدار مایع نفوذ کرده CF که این فاکتورها همگی تابعی از فضا، مکان و استرس هستند.

$$\begin{aligned} G &= G(x, y, z, t, e_{ij}) \\ \phi &= \phi(x, y, z, t, e_{ij}) \\ e_{ij} &= e_{ij}(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (19)$$

که e_{ij} تابعی از فضا و مکان است.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi(e_{ij}) \\ C_F &= C_F(e_{ij}) \\ G &= G(e_{ij}) \\ \rho &= \rho(e_{ij}) \end{aligned} \quad (20)$$

در نتیجه گرانی مشاهده‌ای تابعی به صورت رابطه (۲۱) است:

$$g = g(x, y, z, t, \rho, G, \phi, C_F) \quad (21)$$

همچنین رابطه (۲۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$g = g(\rho, G, \phi, C_F)$$

اگر تغییرات استرس قابل صرف نظر کردن باشد، می‌توان نوشت:

توسط سیالی به چگالی ρ پر شده باشد، آنگاه جرم سیالی که داخل المان نفوذ کرده برابر $m = \alpha \rho V \rho_F$ است؛ بنابراین تغییر گرانی ناشی از نفوذ سیال در منطقه A' مطابق است با اثر گرانی یک استوانه به شعاع a و ارتفاع $H + h$ و چگالی $\alpha \rho \rho_F$.

$$\begin{aligned} \delta g_m &= -2\pi G(\alpha \rho \rho_F) \times \\ &\left[1 - \sqrt{1 + \frac{a^2}{(H+h)^2}} + \frac{a}{H+h} \right] (H+h) \\ &= 2\pi G \alpha \rho \rho_F (H - \sqrt{H^2 + a^2} + a) \end{aligned} \quad (14)$$

بنابراین اثر کلی بر روی گرانی در طی یک پروسه لرزه‌ای از مجموع δg_D و δg_m حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \delta g &= \delta g_D + \delta g_m \\ &= -2\pi G \left[\frac{4}{3} \rho_E - \rho_0 \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{H^2}} - \frac{a}{H} \right) \right] h + \\ &2\pi G \alpha \rho \rho_F (H - \sqrt{H^2 + a^2} + a) \end{aligned} \quad (15)$$

در ادامه مقاله این تغییرات به صورت رابطه ریاضی شامل جمع کلی عبارات مختلف مؤثر در تغییرات گرانی ارائه می‌گردد تا بتوان از آن برای مدل اتساع تلفیقی استفاده نمود.

۴- روابط ریاضی در مدل اتساعی تلفیقی

در حالت کلی می‌توان گرانی را شامل عناصر زیر

دانست:

$$G = Ge + Gg + Gs + Gt + Gn \quad (16)$$

که Ge نشان‌دهنده اثر تغییرات سطحی ارتفاع، Gg اثر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، Gs اثر تغییرات ناشی از فعالیت لرزه‌ای، Gt اثر کشند زمین و اقیانوس و Gn نویز دستگاهی است که شامل دریافت دستگاه می‌شود. سه عبارت اول ممکن است به هم وابسته باشند. در اینجا فرض بر این است که آنها از هم مستقل هستند و همچنین اثر Gg را می‌توان به کمک چاه‌های عمیق تصحیح کرد. با داشتن طول و عرض جغرافیایی Gt قابل محاسبه است. همچنین با اندازه‌گیری منظم و دقیق می‌توان Gn را نیز

در این مدل برای محاسبه مؤلفه عمودی گرانی استوانه یا دیسک از فرمول سینگ (۱۹۹۷) استفاده شده است.

$$g_z = 2\pi G \rho_0 a [I(a, r; t) - I(a, r; l + z)] \quad (23)$$

که در آن:

$$I(a, r; c) = \int_0^\infty J_1(ap) J_0(rp) \exp(-PC) \frac{dP}{P}$$

انتگرال موجود در معادله فوق از نوع لپچیتز-هنکل (Lipschitz-Henkel) است که به طور تحلیلی از رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$I(a, r; c) = \begin{cases} \frac{\sqrt{ar}}{ka} E_0(k) + \frac{a^2 - r^2}{4a\sqrt{ar}} F_0(k) + \frac{c}{2a} \Delta_0(\alpha, \beta) - \frac{c}{a} & (a > r) \\ \frac{E_0(k)}{k} - \frac{c}{2a} & (a = r) \\ \frac{\sqrt{ar}}{ka} E_0(k) + \frac{(a^2 - r^2)k}{4a\sqrt{ar}} F_0(k) - \frac{c}{2a} \Delta_0(\alpha, \beta) & \end{cases} \quad (24)$$

که در آن:

$$\sin^2 \alpha = k^2$$

$$\sin^2 \beta = \frac{c^2}{(a-r)^2 + c^2}$$

$$F_0(k) = \frac{2}{\pi} k(k)$$

$$E_0(k) = \frac{2}{\pi} E(k)$$

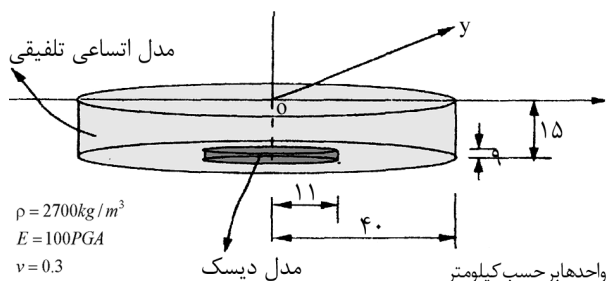
همچنین $K(k)$ و $E(k)$ بیضوی ۲، نوع اول و دوم هسته $\Delta_0(\alpha, \beta)$ تابع دلتای هیومن (Human's lambda) است.

۵- تقسیم‌بندی پروسه لرزه‌ای در مدل اتساعی تلفیقی

در این مدل پروسه لرزه‌ای به سه مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول (I) با افزایش استرس اتساع به‌طور خطی افزایش پیدا می‌کند. در مرحله دوم (II) با رسیدن استرس بحرانی ریزشکست‌ها شروع به افزایش و باز شدن می‌کنند و بالاخره در مرحله سوم (III) آب به داخل حفرات جدید شروع به نفوذ کردن می‌کند. برای حل عددی معادله (۲۵) با توجه به این سه مرحله در هر مرحله المان مؤثر در آن مرحله را به عدد به‌دست‌آمده از معادلات (۲۶) و (۲۷)

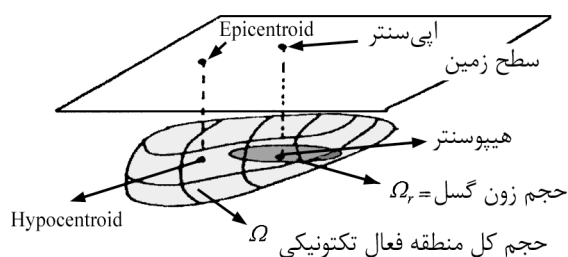
$$\delta g = \frac{\partial g}{\partial \rho} \rho + \frac{\partial g}{\partial G} \partial G + \frac{\partial g}{\partial \phi} \delta \phi + \frac{\partial g}{\partial C_F} \delta C_F \quad (22)$$

در این مدل از دو شکل استوانه و دیسک استفاده می‌شود. برای مثال در منطقه‌ای در چین Beijing - Tianjin - Tangshan - Zhangjiakou (BTZ) با توجه به مسائل زمین‌شناسی و ژئودینامیکی آن منطقه، از یک دیسک به شعاع ۱۱ کیلومتر و ضخامت ۲ کیلومتر بر منطقه چشمه لرزه‌ای و یک استوانه راستگرد به شعاع ۴۰ کیلومتر و ضخامت ۱۵ کیلومتر بر منطقه اتساع یافته، برای مدل‌سازی تغییرات گرانی استفاده شده است. علت این کار آن است که دگرشکلی برای منطقه چشمه بسیار بیشتر از حجم باقیمانده است، شکل (۵).



شکل (۵): شماتیک مدل اتساعی تلفیقی در منطقه BTZ که استوانه نشان‌دهنده منطقه تکتونیک تحت استرس با بزرگی کم و دیسک نشان‌دهنده چشمه لرزه‌ای تحت استرس با بزرگی زیاد است.

برای درک بیشتر این مدل در شکل (۶) نشان داده شده که استوانه و دیسک به چه صورتی در یک محیط طبیعی قرار می‌گیرند. با توجه به شکل زیر دیسک فرضی در مرکز هیپوسنتر (hypo-center) و استوانه فرضی به مرکز اپی‌سنتر (epicenter) قرار می‌گیرد.



شکل (۶): یک منطقه تحت استرس تکتونیک و طرز قرار گرفتن استوانه و دیسک در محیط طبیعی.

اضافه می‌کنیم.

برای سادگی، می‌توان معادله (۱۶) را به صورت زیر نوشت:

$$\delta g = \delta g_1 + \delta g_2 + \delta g_3 + \delta g_4$$

$$\delta g_1 = \frac{\partial g}{\partial \rho} \delta \rho$$

$$\delta g_2 = \frac{\partial g}{\partial G} \delta G \quad (25)$$

$$\delta g_3 = \frac{\partial g}{\partial \phi} \delta \phi$$

$$\delta g_4 = \frac{\partial g}{\partial c_F} \delta c_F$$

گرانی در این سه مرحله معادلات (۲۵) تا (۲۹) را در این سه مرحله و مرحله نهایی آرامش، در یک بازه دو ساله حل می‌کنیم. این عوامل همان‌طور که قبلاً بیان شد عبارتند از: تغییرات چگالی، تغییرات پیکربندی هندسی، تغییرات تخلخل و نفوذ سیال که همگی در یک فعالیت لرزه‌ای تابعی از استرس هستند. برای محاسبه و به دست آوردن رابطه بین این تغییرات با استرس که همان محاسبه توابع f_1 ، f_2 ، f_3 و f_4 است، از روش‌های معکوس استفاده می‌شود (حاجیان ۱۳۸۹).

۶- بررسی یک نمونه عملی

در شکل (۷)، در پنج فاصله مختلف از مرکز استوانه به شعاع ۱۱ کیلومتر و ضخامت ۲ کیلومتر واقع بر منطقه چشمه لرزه‌ای در پنج نمودار زمانی ۲۴ ماهه (دو ساله) مختلف رسم شده است و در هر نمودار هر چهار حالت استرس مورد مطالعه قرار گرفته است. نحوه اعمال روش به این صورت است که با معادلات (۲۵) تا (۲۹) برای هر کدام از فازهای افزایش استرس اتساع به‌طور خطی، رسیدن استرس به استرس بحرانی و شروع به افزایش ریزشکست‌ها و باز شدن آن‌ها و بالاخره در مرحله سوم نفوذ آب به داخل حفرات جدید، تغییرات گرانی مربوطه برحسب میکروگال به‌دست‌آمده و برای زمان‌های دو ساله ترسیم می‌گردد؛ زیرا پروسه کامل از شروع به افزایش استرس تا رسیدن به مرحله ریزشکست‌ها و نفوذ آب به حفرات به‌طور متوسط حداقل ۲۰ الی ۲۴ ماه طول می‌کشد.

در شکل (۷-الف) تغییرات گرانی را در یک پروسه یک‌ساله در روی مرکز استوانه مشاهده می‌کنید و استرس مؤثر در چهار مرحله S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 به ترتیب برابر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۵۰٪ استرس ماکزیمم است. یا به بیان ساده‌تر، در حالت S_4 زمین‌لرزه فرضی بزرگ‌تر از بقیه حالات است. در این نمودارها به‌خوبی تغییرات گرانی در مراحل متفاوت پیش‌لرزه‌های قبل از زلزله، زلزله اصلی و پس‌لرزه‌های پس از آن دیده می‌شود. همچنین اثر فواصل دور در تغییرات گرانی کمتر دیده می‌شود که به دلیل جابه‌جایی کمتر جرم در فواصل دورتر از کانون زلزله می‌باشد [۱۰].

در مرحله (I) تغییرات گرانی ناشی از تغییرات چگالی و تغییرات پیکربندی هندسی است؛ یعنی:

$$\delta g = \delta g_1 + \delta g_2 \quad (26)$$

که δg_1 و δg_2 به صورت زیر هستند. از آنجایی که ρ ، G ، ϕ و c_F همگی تابعی از استرس می‌باشند:

$$\delta g_1 = f_1(G_0) \delta \rho(e)$$

$$\delta g_2 = f_2(\rho_0, G) \delta \rho(e) \quad (27)$$

$$\delta g_3 = f_3(\rho_0, G_0) \delta \phi(e, e_c)$$

که f_1 و f_2 توابع اختیاری هستند. در مرحله دوم (II) فضاهای خالی شروع به گسترش کرده و موقعیت فضایی جسم و حجم آن تغییر می‌کند. همچنین در این مرحله تغییرات چگالی تا رسیدن به استرس بحرانی روند خود را حفظ می‌کند. $\delta g = \delta g_1 + \delta g_2 + \delta g_3$ که δg_1 ، δg_2 و δg_3 از قرار زیر هستند.

$$\delta g_1 = f_2(\rho_0, G) \delta G(e)$$

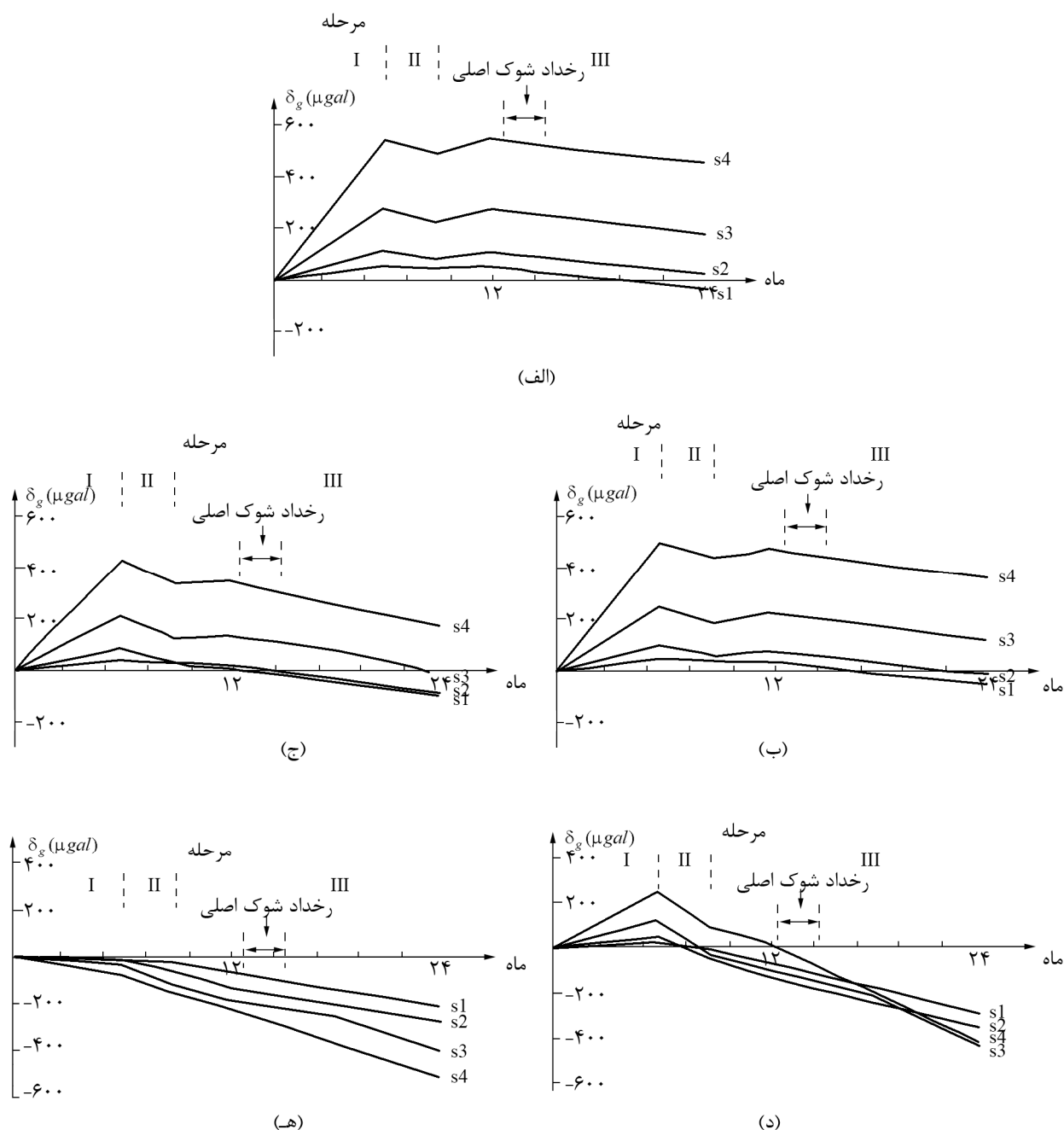
$$\delta g_2 = f_1(G_0) \delta \rho(e_c) \quad (28)$$

در مرحله (III) حجم جسم جامد بدون تغییر باقی می‌ماند. نسبت به مرحله قبل فضای خالی روند افزایش پیشرفت خود را حفظ می‌کند که برای مدل تر داریم:

$$\delta g = \delta g_1 + \delta g_2 + \delta g_3 + \delta g_4$$

$$\delta g_4 = f_4(\rho_0, G_0) \delta c_F \quad (29)$$

و برای مدل خشک داریم: $\delta g_4 = 0$. با توجه به عوامل مؤثر بر



شکل (۷): تغییرات گرانی به دست آمده از مدل اتساعی تلفیقی در چهار حالت استرسی S1 و S2 و S3 و S4 و در پنج فاصله الف) صفر کیلومتر، ب) ۱۰ کیلومتر، ج) ۲۰ کیلومتر، د) ۳۰ کیلومتر و ه) ۵۰ کیلومتری از رومرکز واقع بر محور مشترک بین دیسک و استوانه.

همچنین بررسی بیشتر نمودارهای شکل (۷) نشان دهنده آن است که تغییرات گرانی در پروسه زلزله از آنجا که در فاصله زمانی مناسبی قبل از لرزه اصلی ملاحظه می گردد، می تواند پیش نشانگر خوبی در کنار سایر پیش نشانگر مد نظر قرار گیرد البته ذکر این نکته الزامی است که اصولاً تغییرات گرانی جزو پیش نشانگرهای بلندمدت یا Long Term محسوب می شوند و تلفیق آنها

نمودار تغییرات گرانی در نمودارهای شکل (۷) که برای فواصل مختلف از رومرکز زلزله (واقع بر محور عمودی فصل مشترک دیسک و استوانه) به خوبی نشان می دهد که این روند یعنی تغییرات بزرگ و با شیب زیاد برای فاز پیش لرزه و تغییرات نسبتاً بزرگ ولی با شیبی متوسط برای فاز لرزه اصلی در مورد کلیه فواصل از صفر تا ۵۰ کیلومتر حاکم است.

بررسی تغییرات گرانی در فازهای مختلف رخدادهای لرزه‌ای است که می‌تواند آن را به‌عنوان مدلی توانمند در پیش‌یابی لرزه‌ای مطرح سازد.

مراجع

1. Fujii, T., Takumi, I., Hata, M., and Yasukawa, H. (2006) *Signal Processing of Earthquake Precursor at ELF Band*. Nagoya Inst. of Technology. International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT '06.
2. Barnes, D.F. (1966) Gravity changes during the Alaskan earthquake. *Journal of Geophysical Research*, **71**(2), 451-456.
3. Kuo, J.T. and Yuefeng, S. (1993) Modeling gravity variation caused by dilatancies. *Tectonophysics*, **227**(1-4), 127-143.
4. Walsh, J.B. (1975) An analysis of changes in gravity due to deformation. *Pure and Applied Geophysics*, **113**(1), 97-105
5. Yushida, Sh. (1999) Absolute gravity change associated with the March 1997 earthquake swarm in the Izu Peninsula, Japan. *Earth, Planets and Space*, **51**(1), 3-12
6. Wang, Z. and Lin, T. (1976) Change of gravity in the epicentre area before the Tangshan earthquake. *Earthquake Prediction*, 157-167.
7. Grant, F.S. and West, G.F. (1965) *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill.
8. Lambert, A. and Liard, J.O. (1981) *Earthquake Prediction: an International Review*. Accessible at: <http://www.agu.org/books/me/v004/ME004p0473/ME004p0473.pdf>.
9. Turcotte, D.L. and Schubert, G. (1982) *Geodynamics*. John Wiley & Sons Publication.

۱۰. حاجیان، علیرضا (۱۳۸۹) کاربرد روش اتساع تلفیقی در مدل‌سازی تغییرات گرانی زمین به‌عنوان پیش‌نشانگر زلزله. همایش ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه آزاد نجف‌آباد، مجموعه مقالات.

با سایر پیش‌نشانگرهای زلزله می‌تواند کمک شایان توجهی به افزایش دقت در پیش‌بینی زلزله نماید. محدوده تغییرات همان‌طور که در نمودارهای شکل (۷) دیده می‌شود به‌طور متوسط در اشل صد میکروگال است که به‌خوبی با دستگاه‌های گرانی‌سنجی موجود قابل‌اندازه‌گیری است و باید دستگاه گرانی‌سنج در یک نقطه ثابت به‌طور دائمی مقادیر گرانی را ثبت نماید و گرانی نهایی پس از تصحیحات مذکور در بند ۳ این مقاله معیار خوبی برای مشاهده تغییرات گرانی ناشی از مهاجرت جرم، تغییر حجم و یا تغییرات ارتفاعی ناشی از پیش‌لرزه‌های قبل از زلزله اصلی خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

مدل اتساعی تلفیقی که با در نظر گرفتن فازهای مختلف زلزله بررسی شد، به دلیل در نظر گرفتن اتساع‌های ناشی از دگرشکلی و نیز شکست‌ها، تغییرات چگالی، پیکربندی هندسی در فضا و تداخل از دقت نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی تغییرات گرانی در پروسه‌های لرزه‌ای مربوط به زلزله‌ها برخوردار است. به‌عنوان نمونه عملی برای استوانه‌ای عمودی تغییرات گرانی را در یک پروسه دو ساله در روی فواصل مختلف از مرکز استوانه (رومرکز زلزله) محاسبه نموده و ملاحظه شد استرس مؤثر در چهار مرحله S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 به ترتیب برابر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۵۰٪ استرس ماکزیمم است. یا به بیان ساده‌تر، در حالت S_4 اثر زمین‌لرزه فرضی بر روی تغییرات گرانی محل بزرگ‌تر از بقیه حالات است. در این نمودارها به‌خوبی تغییرات گرانی در مراحل متفاوت پیش‌لرزه‌های قبل از زلزله، حین زلزله اصلی و پس‌لرزه‌های پس از آن دیده می‌شود و روند کلی تغییرات متوسط برای فاز پیش‌لرزه و تغییرات بزرگ برای لرزه اصلی برای تمام فواصل مذکور قابل‌رؤیت است که نشان‌دهنده اهمیت تغییرات گرانی به‌عنوان یکی از پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای در کنار سایر پیش‌نشانگرها است و علاوه بر آن رنج تغییرات در حد صد میکروگال به بالا است که می‌تواند به‌راحتی با میکروگرانی‌سنج‌های موجود آشکارسازی و با دقت بالایی اندازه‌گیری شود. عمده‌ترین مزیت این روش قابلیت آن در

۱۱. زین‌الدینی میمند، رضا و جلال کمالی، حسین (۱۳۹۳) بررسی اثر تغییرات منطقه‌ای گرانش و چگالی بر سلول‌های همرفتی گوشته. مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۶-۱۱.
۱۲. صمیمی‌نمین، سپیده و نعیمی، مجید (۱۳۸۶) مطالعه تغییرات گرانی به عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله. اولین همایش پیش‌نشانگرهای زلزله، مرکز مطالعات پیش‌نشانگرهای زلزله مؤسسه ژئوفیزیک.