



## بررسی پارامترهای اندرکنشی خاک و سازه در پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی دیوار حائل

سید محمد سید کلبادی، رضا راستی اردکانی\*

دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ فروردین ۱۳۹۴  
بازنگری: ۱۰ مرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۰ آبان ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۵ آذر ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

اندرکنش خاک-سازه  
مدل غیرخطی دراکر پراگر  
دیوار حائل  
تحلیل حساسیت  
Abaqus

**چکیده:** انجام گودبرداری‌های عمیق در فضاهای محدود شهری، تثبیت شیروانی‌های خاکی حجیم و احداث دیوارهای ساحلی بلند، مستلزم بهره‌گیری از روش‌های نوین و دقیق تحلیل و محاسبه است. در این مقاله جهت مدل‌سازی و تحلیل، نرم افزار اجزاء محدود Abaqus به خدمت گرفته شد. جهت بررسی دقیق‌تر رفتار دیوار و خاک، از المان Solid و مدل رفتاری غیرخطی برای هر دو مصالح بتن و خاک استفاده شده است. در این مطالعه با انجام بیش از ۵۰ تحلیل در حالت استاتیکی و دینامیکی با تحلیل حساسیت روی پارامترهای موثر در اندرکنش و رفتار مصالح، مقدار پاسخ سازه که همان بیشینه جابجایی دیوار در نظر گرفته شد، محاسبه و نشان داده شد که مهم‌ترین پارامتر اندرکنشی در حالت تحلیل استاتیکی و دینامیکی، چگالی خاک است و این میزان حساسیت در بارهای لرزه‌ای نسبت به تحلیل استاتیکی، حدود ۳۰٪ افزایش خواهد یافت.

### ۱- مقدمه

توسعه ساخت و ساز و کمبود رو به رشد زمین باعث احداث پروژه‌های عمرانی در مناطق ناهموار و پست شده است. به صرفه‌ترین راهکار برای محافظت از این پروژه‌ها در این مناطق و جلوگیری از رانش خاک، استفاده از دیوار حائل می‌باشد. دیوار حایل، فشار ناشی از وضعیت موجود را در اختلاف تراز به وجود آمده به علت خاکریزی، خاکبرداری و یا عوامل طبیعی دیگر، به صورت پایدار تحمل می‌نماید. دو نوع رفتار سازه‌ای در دیوارهای حائل وجود دارد: ۱- رفتار صلب، ۲- رفتار انعطاف پذیر. دیوارهای حائل صلب دیوارهایی هستند که با نشست‌های محیط هماهنگ نیستند؛ شامل: ۱- دیوارهای حائل وزنی (بنایی سنگی یا بتنی غیر مسلح) ۲- دیوارهای حائل غیر وزنی (طره‌ای و پشت بند دار عمدتاً بتن مسلح). دیوارهای حائل انعطاف پذیر دیوارهایی هستند که با نشست‌های محیط خود هماهنگ هستند؛ شامل: ۱- دیوارهای خاک مسلح با تسمه فولادی یا شبکه‌های پلیمری ۲- دیوارهای حائل توری سنگی ۳- دیوارهای قفسه‌ای ۴- بلوک‌های پیش‌ساخته ۵- سپرهای فولادی. یک دیوار حائل باید برای حمایت از بار جانبی و یا فشار از زمین

و یا هر سربار اعمال شده در پشت آن مانند بار اتومبیل و... طراحی شده باشد. طراحی دیوارهای حائل از مسائل مهمی است که مطالعات زیادی روی آن انجام شده است و محاسبه فشار فعال بر دیوارهای حائل از مباحث حائز اهمیت در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. برای دیوارهای قائم برآیند و توزیع فشار وارد بر دیوار و همچنین زاویه گوه گسیختگی بحرانی در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده به خوبی تبیین شده است. رانکین [۱] با صرف نظر از زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار و با فرض آنکه گوه گسیختگی بحرانی با افق زاویه‌ای معادل  $\frac{\Phi}{2} + 45^\circ$  می‌سازد، پارامترهای مذکور را برای دیوارهای قائم به دست آورد. همچنین Coulomb [۲] برای خاک‌های فاقد چسبندگی فشار وارد بر دیوار را محاسبه نموده است. Okabe [۳] و Mononobe [۴] با استفاده از حل Coulomb [۲] برای شرایط شبه استاتیکی و به فرض خاک فاقد چسبندگی فشار فعال وارد بر دیوار را محاسبه نموده‌اند که توسط Nakamura [۵] با استفاده از روش سانتریفیوژ مجدداً آزمایش گردید. همچنین ضرابی کاشانی [۶] رابطه‌ای برای تعیین زاویه گوه گسیختگی به روش Mononobe-Okabe را ارائه کرد. Chang [۷] توزیع فشار فعال برای دیوارهای قائم را مورد بررسی قرار داده است. استادان [۸] همچنین در سال ۲۰۰۵ موفق به ارائه روشی ارتقاء یافته جهت فشار دینامیکی خاک به

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: R\_Rasti@sbu.ac.ir

به صورت زیر نوشته شود:

$$\{\hat{Q}\} = \{Q\} \exp(i\omega t) \quad (2)$$

$$\{\hat{u}\} = \{u\} \exp(i\omega t) \quad (3)$$

وقتی که  $\{Q\}$  و  $\{u\}$  بردارهای مختلط نیرو و جابجایی در فرکانس  $\omega$  هستند. در نتیجه، برای هر فرکانس، معادلات حرکت فرم زیر را خواهند داشت.

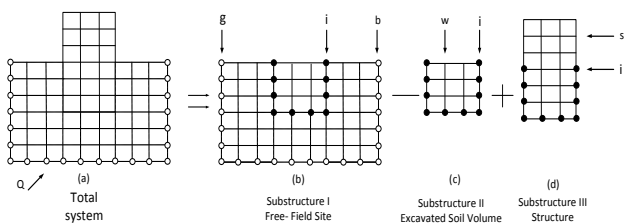
$$[C]\{Q\} = \{Q\} \quad (4)$$

$$[C] = [K] - \omega^2 [M] \quad (5)$$

معادله حرکت برای سیستم اندرکنش خاک-سازه، بصورت زیر تفکیک می‌شود:

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_i^I + X_i & -C_{iw}^I & C_{is}^{III} \\ -C_{iw}^I & -C_w^I & 0 \\ -C_{is}^{III} & 0 & C_s^{III} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_w \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_i u_i \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

وقتی که اندیس‌های I، II و III مربوط به سه زیرسازه و اندیس‌های i، w و s، به ترتیب، مربوط به درجات آزادی متناظر با گره‌های موجود در مرز خاک و سازه، حجم خاک برداشته شده و قسمت رویی سازه می‌باشند (شکل ۱).



شکل ۱: جداسازی زیرسازه‌ها به منظور ساده کردن محاسبات [۱۱].

Fig.1. Sub-structure separation in order to simplify the calculations [11]

در سمت چپ معادله، ماتریس سختی مختلط دینامیکی، وابسته به فرکانس، به سادگی نشان می‌دهد که براساس تقسیم بندی فوق، ماتریس سختی خاک برداشته شده از سختی دینامیکی سازه و میدان آزاد تفریق شده است. ماتریس وابسته به فرکانس  $[X_{ff}]$ ، ماتریس امیدانس نامیده می‌شود که از مبدل زیر سازه I بدست می‌آید. بردار  $\{u_i\}$  یا  $\{u_f\}$  از حرکت میدان آزاد ساختگاه، در نقاط اندرکنشی نشان داده شده در زیر سازه I، بدست می‌آیند. در محاسبات تحلیل امیدانس و محاسبه بردار بار خارجی، اندرکنش در درجات آزادی i در نظر گرفته می‌شود.

#### الف- حل مساله پاسخ ساختگاه

برای حل مساله پاسخ ساختگاه، لازم است که مساله مقدار ویژه برای

دیوار گردید و نیز مالکی و محجوبی [۹] به روشی جدید جهت توصیف فشار دینامیکی خاک پشت دیوار دست پیدا کردند که از نظر صحت، دقیق‌تر از رابطه معروف Mononobe-Okabe می‌باشد.

#### ۲- اندرکنش

باتوجه به اهمیت تعامل خاک و سازه در دیوار حائل، سعی شده با استفاده از مدل اندرکنشی مناسب، اندرکنش خاک و سازه را مدل نمود. همچنین در بحث اندرکنش، روش‌های مختلفی برای حل معادلات کوپل شده خاک-سازه ارائه شده است که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

#### ۲-۱- مدلسازی کلی اندرکنش خاک و سازه

در بررسی مسئله اندرکنش، پاسخ دینامیکی سازه از اثرات متقابل سازه، پی و خاک اطراف متاثر می‌شود. برای تحلیل مسائل اندرکنش دو روش کلی موجود است [۱۰]:

##### ۱- روش زیر سازه، ۲- روش مستقیم

در روش زیر سازه کل محیط نامحدود مدلسازی شده و سپس ماتریس امیدانس خاک محاسبه می‌شود و به سختی دینامیکی سازه افزوده خواهد شد. به این ترتیب مساله شکل ساده‌تری پیدا کرده و محاسبات آسان‌تر خواهد شد. در روش مستقیم تنها قسمتی از محیط خاکی که نزدیک سازه است مدل می‌شود [۱۱] در این روش اشکال هندسی پیچیده، تغییرات خصوصیات خاک و رفتار غیر خطی محیط می‌تواند در نظر گرفته شود. در تحلیل حوزه زمان، می‌توان رفتار غیر خطی مصالح خاک و سازه را نیز در نظر گرفت.

#### ۲-۱-۱- معادلات حرکت

متداول‌ترین روش حل مساله اندرکنش خاک و سازه، تحلیل بر اساس روش زیر سازه است. در این روش، مساله خطی اندرکنش خاک-سازه به یک سری زیر مسئله ساده‌تر تفکیک می‌شود و سپس نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قوا ترکیب می‌شوند.

در روش جداسازی و تفکیک زیر سازه‌ها [۱۱] کل سیستم خاک-سازه، نشان داده شده در شکل ۱، به سه زیر سازه تفکیک می‌شود. زیر سازه I شامل میدان آزاد ساختگاه است، زیر سازه II شامل حجم خاک برداشته شده و زیر سازه III شامل سازه رویی و پی آن است.

در روش تفکیک زیر سازه‌ها، فرض بر این است که اندرکنش خاک و سازه فقط در مرز مشترک زیر سازه‌ها (سطح تماس با خاک) رخ می‌دهد. معادله حرکت زیر سازه‌ها نشان داده شده در شکل ۱، می‌تواند به فرم ماتریسی زیر نوشته شود:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{Q\} \quad (1)$$

برای تحریک هارمونیک با فرکانس  $\omega$ ، بردار بار و جابجایی می‌تواند

$$([A]K^2 + i[B]K + [G] - \omega^2[M])\{V\} = 0 \quad (12)$$

در این شکل موج؛ در مرز هر لایه فقط یک درجه آزادی وجود دارد. ماتریس  $[A]$ ،  $[G]$  و  $[M]$  از ماتریس‌های زیر حاصل می‌شوند:

$$[A_j] = h_j G_j \begin{bmatrix} 1/3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[G_j] = \frac{G_j}{h_j} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[M_j]^{(e)} = \frac{\rho_j h_j}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[M_j]^{(l)} = \frac{\rho_j h_j}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

از حل معادله ۱۲،  $n$  مود موج لاو بدست می‌آید که در محاسبه شرایط امواج گذرا، برای حرکات ارتعاشی خارج از صفحه سیستم، استفاده می‌شوند.

مرزهای جاذب انرژی در امتداد افقی با استفاده از یک حل تحلیلی دقیق و در امتداد قائم بوسیله یک تابع جابجایی سازگار، برش اجزاء محدود، فرموله می‌شوند. این مرزها بطور دقیق انرژی را در امتداد افق عبور می‌دهند.

برای مسائل دوبعدی، واس با استفاده از رابطه تنش و کرنش در هر لایه و مقادیر و بردارهای ویژه، بدست آمده برای حرکات امواج رابلی، رابطه نیرو و تغییر مکان را برای یک سیستم لایه ای، در حوزه فرکانس، به صورت زیر نوشته است:

$$\{P\} = [R]\{u\} \quad (17)$$

وقتی که  $\{u\}$  بردار تغییر مکان  $2n$  مولفه ای،  $\{P\}$  نیروهای مربوطه و  $\{R\}$  سختی دینامیکی سیستم لایه‌ای، در جهت افق نیم بینهایت است، که می‌تواند از رابطه زیر حاصل شود:

$$[R] = i[A][V][K][V]^{-1} + [D] \quad (18)$$

در معادله فوق بعد از تمام ماتریس‌های  $2n \times 2n$  است. ماتریس  $[A]$  در رابطه ۸ تعریف شده است؛ ماتریس  $[V]$  شامل تمام  $2n$  شکل مودی، ماتریس  $K$  یک ماتریس قطری، شامل مقادیر ویژه حرکت موج رابلی، و ماتریس  $[D]$  از جمع مشخصات زیر لایه‌های بدست می‌آید. ماتریس مربوط به لایه  $j$ ام به صورت زیر است:

$$[D] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \lambda_j & 0 & -\lambda_j \\ G_j & 0 & -G_j & 0 \\ 0 & \lambda_j & 0 & -\lambda_j \\ G_j & 0 & -G_j & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

مدل ساخته شده و حل شود. در محاسبات مربوط به امواج حجمی از زیر ماتریس‌های محاسبه شده از مشخصات هر لایه، برای تشکیل دادن معادلات مقدار ویژه استفاده می‌شود.

واس [۱۲]، بر اساس مدل ساختگاه با لایه‌های افقی، و فرض تغییرات خطی تغییر شکل داخل هر لایه؛ مساله مقدار ویژه می‌تواند به دو مساله مقدار ویژه جبری مجزا، یکی موج رابلی و دیگری برای حرکت موج لاو، تقسیم شود.

با استفاده از مدل خاک تفکیک شده، معادله مقدار ویژه برای حرکت موج رابلی؛ می‌تواند به فرم ماتریسی زیر نوشته شود:

$$([A]K^2 + i[B]K + [G] - \omega^2[M])\{V\} = 0 \quad (7)$$

در این مدل، در هر مرز بین دو لایه، دو درجه آزادی وجود دارد، در نتیجه هر سیستم  $n$  لایه؛  $2n$  درجه آزادی خواهد داشت.

در معادله قبل،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای ارتعاش مد، و  $K$  مقدار ویژه است و  $\{V\}$  بردار ویژه  $2n$  مولفه‌ای متناظر است. ابعاد ماتریس‌های  $[A]$ ،  $[B]$ ،  $[G]$  و  $[M]$ ؛  $2n \times 2n$  است و این ماتریس‌ها از جمع کردن ماتریس‌های مربوط زیر لایه‌ها بدست می‌آیند. اگر عمق لایه  $j$ ام از بالا  $h_j$ ، جرم حجمی آن  $\rho_j$ ، مدول برشی آن  $G_j$  و ثابت لایه آن  $\lambda_j$  باشد، این ماتریس‌ها به صورت زیر هستند:

$$[A_j] = \frac{h_j}{6} \begin{bmatrix} 2(\lambda_j + 2G_j) & 0 & (\lambda_j + 2G_j) & 0 \\ 0 & 2G_j & 0 & G_j \\ (\lambda_j + 2G_j) & 0 & 2(\lambda_j + 2G_j) & 0 \\ 0 & G_j & 0 & 2G_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[B_j] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 0 & -(\lambda_j - G_j) & 0 & (\lambda_j + G_j) \\ (\lambda_j - G_j) & 0 & (\lambda_j + G_j) & 0 \\ 0 & -(\lambda_j + G_j) & 0 & (\lambda_j - G_j) \\ -(\lambda_j + G_j) & 0 & -(\lambda_j - G_j) & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[G_j] = \frac{1}{h_j} \begin{bmatrix} G_j & 0 & G_j & 0 \\ 0 & (\lambda_j + 2G_j) & 0 & -(\lambda_j + 2G_j) \\ -G_j & 0 & G_j & 0 \\ 0 & -(\lambda_j + 2G_j) & 0 & (\lambda_j + 2G_j) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[M_j]^{(e)} = \frac{\rho_j h_j}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad [M_j]^{(l)} = \frac{\rho_j h_j}{6} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ماتریس‌های  $[M_j]^{(e)}$  و  $[M_j]^{(l)}$ ، ماتریس‌های جرم پیوسته و جرم متمرکز می‌باشند. با استفاده از تکنیک‌های عددی، پیشنهاد شده بوسیله واس، معادله مقدار ویژه شماره ۷ می‌تواند حل شود. از حل معادله؛  $2n$  مود رابلی و  $2n$  عدد موج بدست می‌آید که از آن‌ها در محاسبه شرایط مرزهای جاذب انرژی، در حالت وجود حرکات تغییر شکلی امواج در صفحه مدل سیستم، استفاده خواهد شد. براساس مدل خاک لایه‌ای، مساله مقدار ویژه برای حرکت موج لاو می‌تواند به فرم زیر نوشته شود:

بعد از محاسبه المان‌های ماتریس‌های جرم و سختی، معادله حرکت بصورت زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} C_c & C_e \\ C_e & C_p + R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c \\ u_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

وقتی که  $C$  ماتریس سختی دینامیکی  $(C = K - \omega^2 M)$  و  $R$  ماتریس امیدانس مرزهای جاذب انرژی است. اندیس های  $c$  و  $p$  مربوط به درجات آزادی روی خط مرزی و محیط مدل و  $u_p$  و  $u_c$ ، اندازه جابجایی‌های متناظر می‌باشند. جابجایی گره‌های بیرونی مدل  $(r > r_0)$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\{u(r)\}_m = [w(r)]_m \{\Delta\}_m \quad (24)$$

اندیس  $m$  مربوط به درجه هارمونیک فوریه است و بردار زیر ضرایب مشارکت مودی، وابسته به  $3n$  مود تغییر شکلی سیستم خاکی  $n$  لایه، می‌باشد:

$$\{\Delta\}_m^T = \langle \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3n} \rangle \quad (25)$$

و ماتریس  $[W(r)]_m$  یک ماتریس  $3n \times 3n$  است که تابع فاصله شعاعی از محور مدل، مقدار ویژه، بردار ویژه و توابع هانکل نوع دوم درجه  $m$  می‌باشد [۱۵]. با داشتن بردار مشارکت مودی، معادله ۲۴ برای محاسبه جابجایی، در هر نقطه به فاصله شعاعی  $r$  از محور مدل، به کار می‌رود. ماتریس نرمی دینامیکی در هر فرکانس تحلیل، یک ماتریس  $3i \times 3i$  برای یک سیستم با  $i$  گره اندرکنشی در محیط میدان آزاد خاک است.

در روش مستقیم محاسبه امیدانس، لازم است که ماتریس نرمی  $[F_f]$  برای تمام گره‌های اندرکنشی محاسبه شود. سپس ماتریس امیدانس  $[X_f]$  از معکوس کردن ماتریس نرمی دینامیکی محاسبه می‌شود:

$$[X_f] = [F_f]^{-1} \quad (26)$$

### ج- تحلیل سازه ای

در این قسمت مشخصات سازه‌ای و خاک برداشته شده، استفاده شده در ماتریس ضرایب معادله حرکت (معادلات ۶-۲) شامل مولفه‌های  $C_s$ ،  $C_i$  و  $C_{ii}$  محاسبه می‌شود. سازه و خاک برداشته شده، بوسیله مدل‌های استاندارد اجزاء محدود مدل می‌شود، سپس مشخصات دینامیکی آن‌ها محاسبه می‌شود.

### ۲-۱-۲- حل معادله حرکت

در حالت تحریک پایدار دینامیکی سیستم خاک-سازه، معادله ۶ در فرکانس‌های هارمونی مجزای انتخاب شده، شکل داده و حل می‌شود. در حالت تحریک هارمونیک نتایج  $(u_f, u_s)$ ، توابع تبدیل

ماتریس  $[R]$  در محاسبه ماتریس نرمی دینامیکی، برای حل مساله امیدانس، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

چن [۱۳] با استفاده از سیستم خاکی  $n$  لایه، معادله حرکت برای امواج مایل  $SV$  را نوشت. معادله حرکت سیستم خاکی، قرار گرفته تحت اثر امواج  $SV$ ، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$([A]K^2 + [\bar{B}]K + [G] - \omega^2[M])\{u\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (20)$$

ماتریس‌های  $[A]$ ،  $[G]$  و  $[M]$  از جمع زیر ماتریس‌های تعریف شده در روابط ۸، ۱۰ و ۱۱ بدست می‌آیند. ماتریس  $[B]$  از جمع زیر ماتریس‌های  $[\bar{B}_j]$ ، تعریف شده به صورت زیر، بدست می‌آید:

$$[\bar{B}_j] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & (3G_j - M_j) & 0 & -(G_j - M_j) \\ (3G_j - M_j) & 0 & (G_j - M_j) & 0 \\ 0 & (G_j - M_j) & 0 & (3G_j - M_j) \\ -(G_j - M_j) & 0 & (3G_j - M_j) & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

وقتی که  $M_j$  و  $G_j$  مدول‌های مقید کننده و برشی لایه لام می‌باشند؛ بردار  $\{P_b\}$  یک بردار دو مولفه‌ای است که بردار بار در پایین لایه (بستر سنگی) را تعریف می‌کند. از حل معادله ۲۰ بردار تغییر مکان  $\{u\}$  بدست می‌آید. حرکت میدان آزاد، در هر فاصله  $x$  می‌تواند با استفاده از معادله زیر بدست آورده شود:

$$\{u(x)\} = \delta \cdot \exp(-ikx) \quad (22)$$

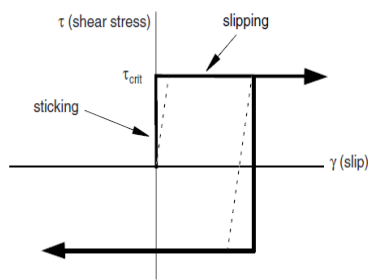
$\delta$  ضریب مشارکت مودی است که با اعمال حرکت کنترلی در نقطه محاسبه می‌شود.

نیم فضای نیم بینهایت را، در صورت وجود، می‌توان به وسیله دو روش عمق متغییر و مرز لزوج در پایه مدل سازی کرد.

روش‌های زیر سازه، فقط برای آنالیزهای خطی معتبر هستند. اما به خوبی شناخته شده است که خاک‌ها، در پاسخ به بارگذاری دینامیکی، رفتار غیر خطی وابسته به کرنش از خود نشان می‌دهند. رفتار غیر خطی خاک را می‌توان با استفاده از روش معادل خطی، پیشنهاد شده بوسیله سید و ادیس [۱۴] و دیگران در نظر گرفت. در این روش؛ مشخصات غیر خطی خاک به وسیله مشخصات خطی معادل، شامل مدول برشی و ضریب میرایی، تخمین زده می‌شود.

### ب- حل مساله امیدانس

در روش تفکیک زیر سازه‌ها، معادلات حرکت سیستم SSI، شامل ماتریس امیدانس  $[X_f]$ ، به صورت نشان داده شده در معادله ۶ است. در این روش ماتریس امیدانس فقط برای گره‌های مرزی محاسبه می‌شود. (گره‌های  $i$  در شکل ۱). در هر فرکانس آنالیز ماتریس امیدانس به وسیله ماتریس نرمی دینامیکی، محاسبه می‌شود. در مسائل سه بعدی، مساله برآورد ماتریس نرمی دینامیکی به مساله پیدا کردن پاسخ سیستم لایه‌ای افقی به بارگذاری در مرز لایه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۲: رفتار اصطکاکی سطوح تماسی [۱۴]

Fig.2. Friction behavior of contact surface

دو سطح لازمه برای تخصیص عبارتند از:

۱. سطح داخلی دیوار در تماس با خاک، ۲. سطح خاک در تماس با دیوار. همچنین دو نوع رفتار برای مشخصات اندرکنش در نظر گرفته شده است:

۱- رفتار نرمال، ۲- رفتار مماسی

رفتار نرمال اندرکنش خاک وسازه از نوع *hard contact* در نظر گرفته شده است. این نوع از رفتار، خصوصیات زیر را دارد:  
الف) سطوح انتخابی تا وقتی که تماس کامل برقرار نکنند (گره‌های سطح *master* به گره‌های سطح *slave* تماس پیدا نکنند) فشار تماسی را انتقال نمی‌دهند.

ب) در هنگام تماس بین دو سطح هیچ محدودیتی برای مقدار فشار تماسی انتقالی وجود ندارد و برنامه به تحلیل ادامه می‌دهد. این نوع تماس، نفوذ احتمالی یک سطح در سطح تابع را به حداقل ممکن می‌رساند.

#### ۴- مشخصات مصالح

پاسخ سازه وابسته به مدل رفتاری تعریف شده در مدل اجزای محدود می‌باشد لذا تعریف دقیق مشخصات مکانیکی مصالح از جمله تعریف رفتار غیر خطی مصالح و غیر خطی هندسی (متفاوت بودن پریود نوسانی طبیعی خاک و سازه) می‌تواند به صحت نتایج اعتبار ببخشد. از این رو مدل رفتاری غیر خطی دراکر-پراگر برای خاک و مدل رفتاری غیر خطی بتن در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۱- مدل دراکر-پراگر

شبیه سازی بخش غیر خطی رفتار خاک با استفاده از مدل خمیری دراکر-پراگر اصلاح شده (کلاهیکی) انجام شده است، که برای آن نیز می‌بایست سطح تسلیم، قانون جریان و قانون سخت شدگی را مشخص نماییم. سطح گسیختگی دراکر-پراگر از رابطه ۲۹ بدست می‌آید [۱۷]:

$$F_s = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (29)$$

که در آن  $d(\theta, f_i)$  و  $\beta(\theta, f_i)$  به ترتیب نشان دهنده زاویه اصطکاک ماده و چسبندگی آن می‌باشد و می‌تواند تابع دما،  $\theta$  و

مختلط هارمونیک شتاب هستند که نشان دهنده پاسخ کل سیستم به حرکت ورودی هارمونیک در نقطه کنترل می‌باشند. حرکت‌های گذرا مثل زلزله، با استفاده از تکنیک تبدیل فوریه مجزا تحلیل می‌شوند. با استفاده از این تکنیک‌ها، حرکت ورودی پایه مشخص شده در  $N$  نقطه مجزا، بصورت یکنواخت روی پریود  $T$  توزیع می‌شوند.

نتیجه نهایی بعد از جمع کردن بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{Bmatrix} u_x(t) \\ u_f(t) \end{Bmatrix} = \text{Re} \sum_{j=0}^{N/2} \begin{Bmatrix} u_{\dot{x}} \\ u_f \end{Bmatrix} \exp(i\omega_j t) \quad (27)$$

مقادیر مجزا  $\{u(t)\}$  در فاصله‌های زمانی  $\Delta t$  می‌تواند به وسیله تبدیل معکوس فوریه روی  $\{u_f\}$ ، حل برای یک ورودی هارمونیک منفرد، محاسبه شود. برای حل کامل، سیستم معادلات خطی باید تشکیل و برای تمام فرکانس‌های FFT حل شود که مستلزم حجم و زمان کار کامپیوتری بالایی می‌باشد. برای به حداقل رساندن هزینه، می‌توان از یک فرکانس حدبالا و همچنین از یک روش درونیابی کارا استفاده کرد به نحوی که دامنه‌های پاسخ مختلط  $u_s$  و  $u_f$  در یکسری فرکانس مهم انتخاب شده محاسبه می‌شوند و مقادیر پاسخ در دیگر فرکانس‌های FFT می‌تواند به وسیله درونیابی مشخص شوند [۱۵].

#### ۳- نحوه مدل سازی اندرکنش

در این مقاله از مدل معمول در تعریف اندرکنش سطوح تماس یعنی مدل اصطکاک کولمب استفاده شده است. این مدل با استفاده از الزام *Contact* که در ادامه توضیح داده خواهد شد اعمال گردیده است. مدل اصطکاک کولمب، رفتار اصطکاکی بین سطوح تماس را با استفاده از یک ضریب اصطکاک  $\mu$  مشخص می‌کند. در ابتدا ضریب اصطکاک پیش فرض برابر صفر می‌باشد و لذا جابه جایی مماسی صفر خواهد بود تا زمانی که کشش سطحی از یک مقدار بحرانی برای تنش برشی، تجاوز کند، که بستگی به فشار تماس عمودی دارد و مطابق معادله ۲۸ زیر تعیین می‌گردد [۱۶]:

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (28)$$

که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک و  $P$

$P$  فشار تماس بین دو سطح می‌باشد. این معادله مقدار حدی تنش برشی را برای سطوح تماس شرکت کننده در برخورد مشخص می‌کند. سطوح تماس، لغزشی بر روی هم نخواهند داشت تا زمانی که تنش برشی در بین آن‌ها برابر تنش برشی اصطکاکی حدی شود که نمودار رفتاری، در زیر نشان داده شده است.

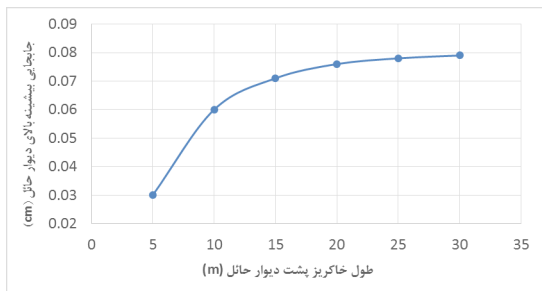
### ۵- مدل اجزاء محدود

نرم افزار Abaqus یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه ساز مبتنی بر حل عددی اجزاء محدود می باشد. این نرم افزار به دلیل دارا بودن مدل رفتاری های جامعی از مصالح در کتابخانه خود و کاربر پسند بودن محیط کار، جهت مدل سازی و تحلیل انتخاب شده است. در این راستا برای تحلیل دقیق تر مسئله از المان حجیم 3d stress solid برای توصیف رفتار خاک و دیوار استفاده گردیده است. این المان قادر به تحلیل سه بعدی می باشد. از آنجا که مجموعه دیوار و خاک پشت آن، در طول زیاد دارای یک سطح مقطع ثابت می باشند، بنابراین فرض کرنش مسطح برای شرایط مرزی جانبی مدل خاک و دیوار، صحیح بنظر می رسد. بنابراین برای بیان رفتار کل مجموعه فقط قسمتی از کل طول مجموعه مدل سازی شده و شرایط مرزی جانبی مجموعه خاک و دیوار در دو حالت استاتیکی و دینامیکی، از نظر درجه آزادی، متقارن و قسمت پایین آن کاملاً مقید شده است. دورترین نقاط خاک از دیوار بدلیل فاصله مناسب از دیوار و تاثیر نداشتن بر پاسخ دیوار، گیردار فرض شده است. همچنین در حالت دینامیکی، بارگذاری زلزله از وجه پایین خاک و دیوار، به مدل اعمال شده است.

تعداد کل المان های شبکه بندی شده، حدود ۱۵۰۰۰ می باشد. این تعداد بصورت بهینه بدست آمده است. در ابتدا با آنالیز حساسیت، طول بهینه خاک پشت دیوار بدست آمده شد و نهایتاً شبکه بندی المان های نزدیک به دیوار، اندازه کوچک و المان هایی که دور از دیوار هستند و بر پاسخ سازه تاثیر چندانی ندارند، در اندازه بزرگتری در نظر گرفته شده اند. المان های بکار رفته از نوع چهار وجهی هشت گره ای می باشند. ابعاد المان ها به نحوی انتخاب شده است که المان ها، مکعبی شکل و منظم باشند. همچنین برای انتقال صحیح موج در

مدل های عددی ابعاد المان به طور تقریبی باید از  $\frac{1}{10}$  تا  $\frac{1}{8}$  طول موج

$\lambda$  مربوط به بیشترین فرکانس موج ورودی کمتر باشد [۱۸]. با توجه به حداکثر طول موج در نظر گرفته شده در این مطالعه، ابعاد مجاز المان ۵ سانتی متر است.



شکل ۵: تحلیل حساسیت طول بهینه خاکریز پشت دیوار

Fig.5. Sensitive analysis for optimum length of soil

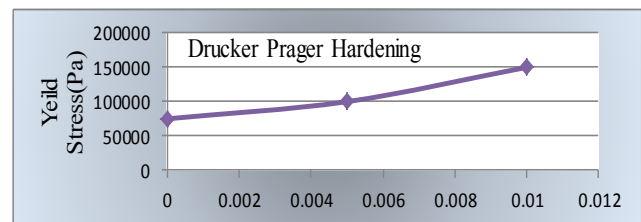
دیگر موارد تعریف شده باشد.  $t$  و  $P$  به ترتیب مقدار تنش انحرافی و تنش فشاری معادل می باشند [۱۷].

خاک مبنای انتخاب شده بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، نوع IV می باشد که جزء خاک های نرم محسوب می شود. در ادامه با تغییر پارامترهای تاثیر گذار در اندرکنش و پاسخ سازه، در حدود ۵۰ آنالیز با پارامترهای مختلف انجام شده است که در ادامه، تحت نمودارهای مختلف به نمایش گذاشته شده اند.

### جدول ۱: مشخصات مکانیکی خاک مینا

#### Mechanical characteristics of soil

۱۷۰۰	$\frac{kg}{m^3}$ Mass Density
۳۵	Angel Of Friction
۰.۸	Flow Stress Ratio Mpa
۴.۸۱	Dilation Angel
۱۰	$\alpha$   Damping
۰	
۱۰۷,۱۶۶	Young's Modulus $\frac{N}{m^2}$
۰.۴	Poisson Ratio

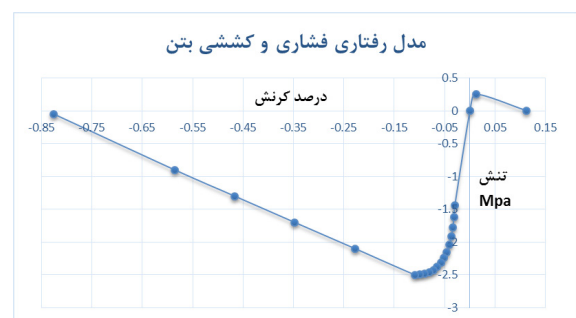


شکل ۳: سخت شونده گی تنش-کرنش دراگر-پراگر

Fig.3. Drucker-Prager hardening stress

### ۴-۲- مدل رفتاری بتن برای دیوار حائل

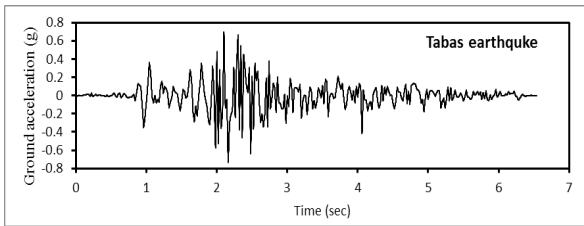
این مدل با استفاده از رفتار غیر خطی بتن در ناحیه فشاری و رفتار خطی در ناحیه کششی بیان شده است [۱۸].



شکل ۴: مدل رفتاری فشاری و کششی بتن

Fig.4. Compression and tension behavior of concrete

به سازه وارد شود. همچنین از آنجا که صرفاً تاثیر پارامترهای موثر بر پاسخ اندرکنشی سازه مورد بررسی قرار گرفته است لذا بار لرزه ای فقط در راستای عمود بر دیوار به دیوار اعمال شده است.



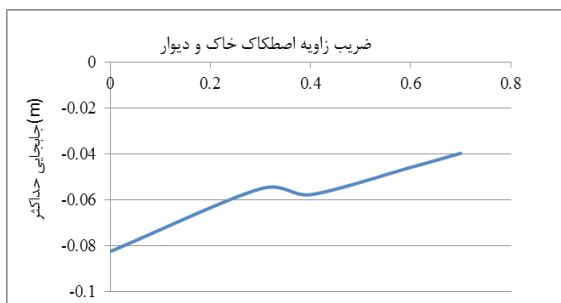
شکل ۸: شتاب نگاشت زلزله طَبس

### Ground Motion Time History of Tabas

## ۷- تحلیل عددی اجزای محدود

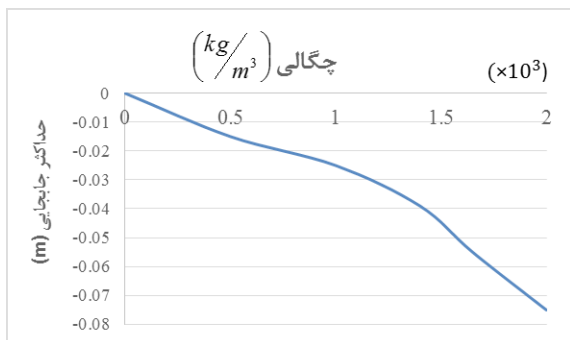
### ۷-۱- آنالیز استاتیکی

در این بخش به بررسی پارامترهای موثر در اندرکنش خاک و سازه و تاثیر آن بر پاسخ سازه پرداخته می‌شود. بیشینه نیرو و تنش برشی پایه دیوار و یا بیشینه لنگر خمشی پی دیوار از جمله مقادیر بحرانی و مهمی هستند که می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. رفتار طره‌ای دیوار حائل (گیرداری تکیه گاه پی آن و حرکت آزادانه بالایی دیوار)، سبب شده است، تمامی نتایج یاد شده رابطه مستقیمی با بیشینه جابجایی بالایی دیوار داشته باشند. همچنین بعد جابجایی می‌تواند از نظر فیزیکی ملموس‌تر باشد؛ بنابراین حداکثر جابجایی در راستای زلزله که در بالایی دیوار می‌باشد به‌عنوان پاسخ مورد بررسی، در نظر گرفته شده است.



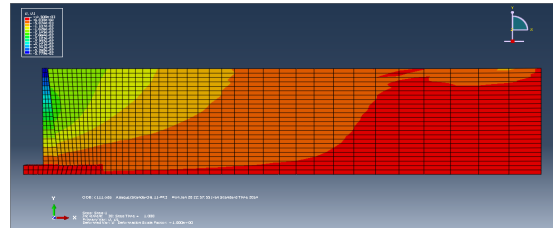
شکل ۹: تغییرات پاسخ نسبت به زاویه اصطکاک دیوار

Fig.9. Responses change depended to the friction angel of wall



شکل ۱۰: تغییرات پاسخ نسبت به چگالی خاک

Fig.10. Responses change depended to the soil density



شکل ۶: دیوار حائل مدل شده در نرم افزار آباکوس

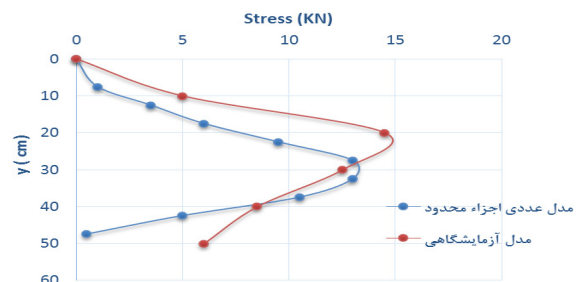
### جدول ۲: مشخصات هندسی مدل

#### Geometrical characteristics of model

عرض دیوار (m)	طول بهینه خاک پشت دیوار (m)	ضخامت پای دیوار (cm)	ضخامت بالایی دیوار (cm)	ارتفاع دیوار (m)
۱	۲۵	۶۰	۳۰	۵

### ۵-۱- صحت سنجی

برای کسب اطمینان از درستی نتایج مدل عددی مورد مطالعه به کمک نرم افزار Abaqus، نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] با شرایط مشابه (مشخصات خاک و ابعاد مدل و دیوار) تحت سربار قائم ۵۰ kpa در طول ۲۰ سانتی‌متر (فاصله افقی مرکز سربار با دیوار)، مقایسه شده و همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کلیات و روند توزیع رانش در هر دو حالت برابر است و حداکثر مقدار رانش در مدل عددی و آزمایشگاهی اختلافی کمتر از ۱۵٪ دارند و این به معنی قابل اعتماد بودن مدل عددی است.



شکل ۷: صحت سنجی فشار جابی خاک نسبت به عمق مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی

Fig.7. Verification of numerical and experimental lateral soil pressure depended to the depth

## ۶- بارگذاری

بارگذاری در دو بخش استاتیکی و دینامیکی اعمال شده است. در بخش استاتیکی فقط اثر نیروی گرانش و در بخش تحلیل دینامیکی از رکورد زلزله دلخواه (طَبس) استفاده شده است. هدف از این انتخاب، بررسی رکورد زلزله خاصی نبوده است؛ بلکه حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد که شتابنگاشت یک زلزله دلخواه می‌تواند به عنوان بار ورودی

پی بردن به اینکه چه پارامتری بر اثر اندرکنشی و میزان پاسخ، تاثیر بیشتری می‌گذارد باید به نرخ پاسخ توجه کرد لذا پارامتری بی بعد تحت عنوان  $\beta$  تعریف می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

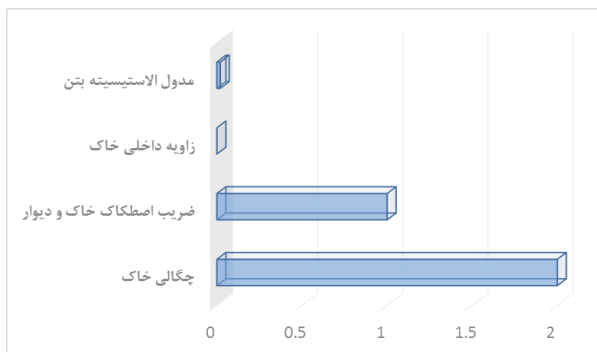
$$\beta = \left| \frac{R}{\alpha} \right| \quad (32)$$

$\beta$  = پارامتر حساسیت

$R$  = درصد تغییرات پاسخ

$\alpha$  = درصد تغییرات پارامتر مورد نظر

با توجه به نمودار زیر، پاسخ سازه نسبت به تغییرات چگالی حساس تر است و زاویه اصطکاک داخلی اثر محسوسی بر پاسخ نمی‌گذارد.



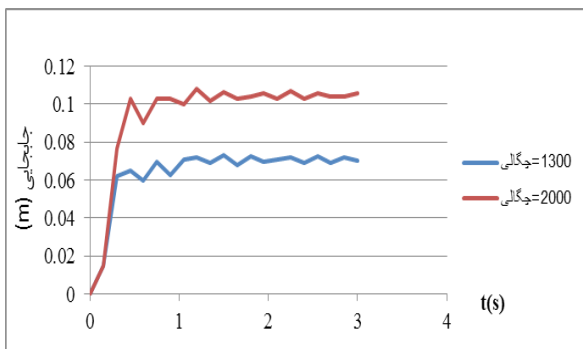
شکل ۱۳: نمودار نرخ پاسخ استاتیکی سازه بر حسب کمیت  $\beta$

Fig.13. The Rate of Statically Response Curve According to the  $\beta$

با توجه به نمودار بدون بعد شکل ۱۳، حساسیت پاسخ سازه نسبت به پارامترهایی نظیر چگالی خاک و ضریب اصطکاک خاک و دیوار تاثیر زیاد و دارای مقدار حساسیت ۲ و نیز پارامترهایی نظیر زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته بتن تاثیر ناچیزی بر پاسخ لرزه ای دیوار دارند.

#### ۷-۲- آنالیز دینامیکی

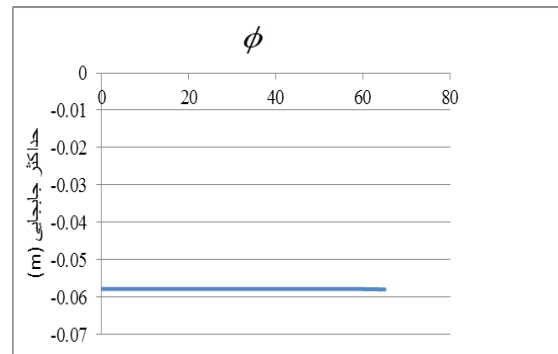
در این بخش به بررسی پارامترهای موثر در اندرکنش خاک و سازه و تاثیر آن بر پاسخ سازه در حالت دینامیکی پرداخته می‌شود.



شکل ۱۴: نمودار جابه جایی بر حسب زمان برای تغییر چگالی

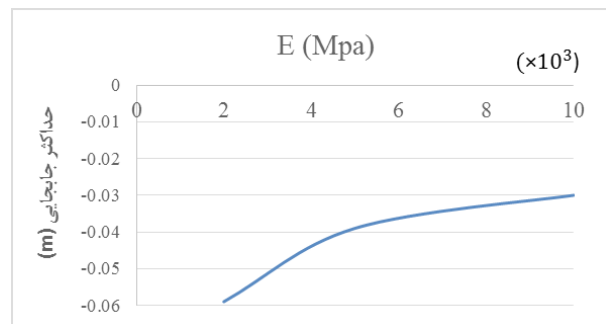
Fig.14. Displacement-time curve for density range

با توجه به نتایج شکل ۹ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش ۱۰۰ درصدی ضریب زاویه خاک و دیوار حدود ۶۷٪ کاهش می‌یابد. چرا که با افزایش اصطکاک بین دیواره و توده خاک، این دو محیط با هم در برابر بارهای وارده مقاومت کرده و افزایش این مقاومت بسیج شده، منجر به کاهش دامنه نواسان یا جابجایی می‌شود. این اعداد نشان دهنده سهم چشمگیر این پارامتر اندرکنشی بر رفتار دیوار می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۰، با ۲ برابر شدن چگالی خاک، پاسخ سازه حدوداً ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش چگالی، وزن خاک و نیروی فشاری به دیواره افزایش یافته و بدیهی است، پاسخ‌ها نیز افزایش یابند. بدین معنی که حساسیت رفتار دیوار نسبت به این پارامتر بسیار حساس است.



شکل ۱۱: تغییرات پاسخ نسبت به زاویه اصطکاک داخلی

Fig.11. Responses change depended to the internal friction angel

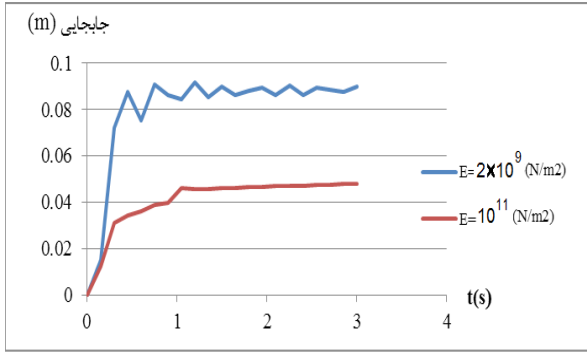


شکل ۱۲: تغییرات پاسخ نسبت به مدول الاستیسیته بتن مسلح

Fig.12. Responses change depended to the concrete Young's modulus

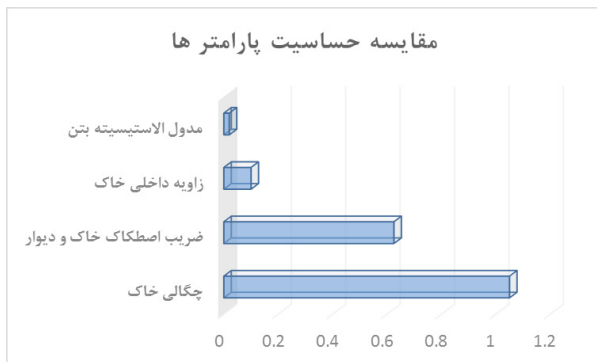
همانطور که در جدول ۱ اشاره شد، خاک مورد بررسی شده از نوع IV می‌باشد. رفتار اینگونه از خاک‌ها بیشتر از آنکه وابسته به زاویه اصطکاک داخلی باشد، متاثر از چسبندگی و دیگر پارامترها می‌باشد. لذا انتظار می‌رود در این نوع خاک‌ها، پاسخ خاک نسبت به زاویه اصطکاک داخلی ناچیز باشد شکل ۱۱، مویید این مطلب است و دیده می‌شود پاسخ سازه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک حساسیتی ندارد. همچنین با توجه به شکل ۱۲، تغییرات سختی دیوار حائل بر پاسخ دیوار تاثیر بسزایی دارد. به عبارت دیگر، با ۲ برابر شدن سختی ارتجاعی دیوار، پاسخ آن ۲۵٪ کاهش می‌یابد. با توجه به هم بعد نبودن پارامترهای مورد بررسی، برای مقایسه و





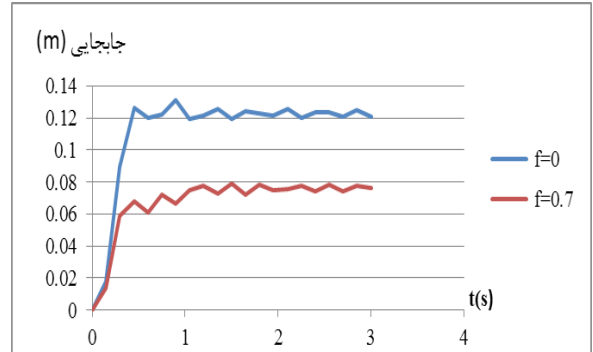
شکل ۱۷: نمودار جابه جایی بر حسب زمان برای تغییر مدول الاستیسیته  
Fig.17. Displacement-time curve for Young's modulus range

با افزایش ۵ برابری مدول الاستیسیته بتن، جابجایی سازه حدوداً ۵۰٪ کاهش می‌یابد زیرا با افزایش مدول الاستیسیته، سختی دیوار نیز افزایش یافته و در نتیجه، پاسخ‌های آن کم می‌شود. این یعنی تاثیر ناچیز پارامتر ذکر شده بر پاسخ سازه.



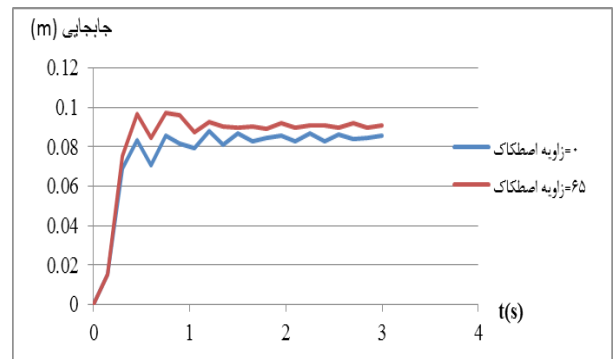
شکل ۱۸: نمودار نرخ پاسخ دینامیکی سازه بر حسب کمیت  $\beta$   
Fig.18. The Rate of Dynamic Response Curve According to the  $\beta$

با توجه به نمودار بدون بعد شکل ۱۸، حساسیت پاسخ سازه نسبت به پارامترهای بررسی شده به وضوح قابل مقایسه است. پارامترهایی نظیر چگالی، ضریب اصطکاک خاک-دیوار، دارای حساسیت زیاد، به ترتیب دارای مقادیر ۱ و ۰.۶ و نیز پارامترهایی نظیر زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته بتن تاثیر ناچیزی بر پاسخ لرزه‌ای دیوار دارند.



شکل ۱۵: نمودار جابه جایی بر حسب زمان برای تغییر ضریب اصطکاک داخلی خاک و سازه  
Fig.15. Displacement-time curve for friction coefficient range of wall

با توجه به نمودارهای حاصل از انجام تحلیل‌های دینامیکی مشاهده می‌شود، با افزایش ۲ برابری چگالی خاک، پاسخ سازه ۱/۵ برابر می‌شود که علت آن افزایش فشار جانبی وارد بر دیواره به علت افزایش وزن خاک می‌باشد. این روند بطور عکس در خصوص پارامتر ضریب اصطکاک داخلی خاک و سازه صادق است. زیرا با افزایش چسبندگی خاک و دیواره، عملاً مقاومت بیشتری در برابر بارهای وارده بسیج می‌شوند که در صورت اعمال بار ثابت، منجر به کاهش پاسخ‌ها می‌شوند.



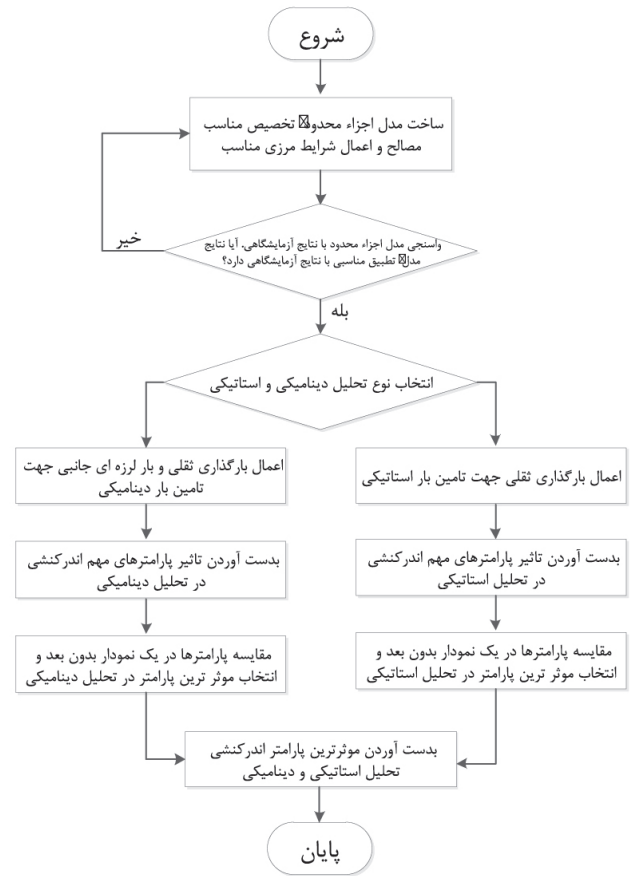
شکل ۱۶: نمودار جابه جایی بر حسب زمان برای تغییر زاویه اصطکاک داخلی  
Fig.16. Displacement-time curve for internal friction angle range of soil

زاویه اصطکاک داخلی خاک در محدوده بین خاک‌های ریز دانه رسی (بدون زاویه اصطکاک داخلی) و خاک‌های دانه‌ای با زاویه اصطکاک داخلی بالا تغییر داده شد اما پاسخ سازه در حدود کمتر از ۱۰٪ می‌باشد که در این محدوده وسیع، تغییر محسوسی نداشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، پاسخ سازه به پارامتر مذکور متاثر نمی‌باشد.

سطح بیشتر باشد، پاسخ سازه کاهش می‌یابد زیرا مقاومت بسیج شده در برابر بارهای اعمالی علاوه بر دیوار، از خاک نیز نشأت می‌گیرد. با افزایش ضریب زاویه از مقدار صفر (سطح بدن اصطکاک) تا مقدار  $0.7$  (اصطکاک بالای مربوط به سطوح زبر و چسبنده) میزان پاسخ دیوار، حدود  $35\%$  کاهش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین نتایج یافت شده، این است که اگر بتوان گیرداری دیوار و خاک را به نحوی افزایش داد (همانند دوختن دیوار بوسیله میلگرد به خاک)، میزان رانش فعال دیوار حائل بشدت کاهش می‌یابد. مدول ارتجاعی بتن و زاویه اصطکاک داخلی خاک تاثیر کمتری نسبت به دو پارامتر قبلی بر پاسخ دیوار دارند. این بدان معنا نیست که نوع خاک و سختی ارتجاعی دیوار تاثیر کمی بر پاسخ سازه داشته باشند بلکه صرفا تاثیر پارامترها بصورت نسبی بدست آورده شده اند.

### مراجع

- [1] Rankine, W. J. M. (1857). "on the mathematical theory of the stability of earthwork and masonry." *Proc. Of the Royal Society* 8(11).
- [2] Coulomb, C. A. (1776). "Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques de stratique relatifs a l' architecture, in: Memoires de mathematique et de physique." Presentes a l' academie royale des sciences, Paris 7(3): 19.
- [3] Okabe, S. (1926). "General theory of earth pressures." *J. Japan Soc. Civil Engineering* 12(1): 22.
- [4] Mononobe N., M. H. (2006). on the determination of earth pressure during earthquakes. *Proc. Of the World Engineering Congress*. Tokyo 2: 11.
- [5] Nakamura, S. (2006). "Reexamination of Mononobe-Okabe theory of gravity retaining wall using centrifuge model tests." *Soil and Foundations* 42(2): 11.
- [6] Zarrabi-Kashani, K. (1979). Sliding of gravity retaining wall during earthquakes considering vertical accelerations and changing inclination of failure surface. Department of Civil Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. M.Sc.
- [7] Cheng, Y. M. (2003). "Seismic lateral earth pressure coefficients for C- $\phi$  soils by slip line method." *Computers and Geotechnics* 30(2): 9.
- [8] Ostadan, F. (2005). "Seismic Soil Pressure for Building Walls: An Updated Approach." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20(1): 51.
- [9] Maleki, S. and Mahjoubi, S. (2010). "A New Approach for Estimating the Seismic Soil Pressure on Retaining Walls." *Scientia Iranica* 17(4): 273.
- [10] Lysmer, J., Ostadan, F. and Chin, C. C (1999). SASSI2000, theoretical manual and user's manual. Geotechnical Eng. Division. Berkeley, Univ. of



شکل ۱۹: فلوجارت تعیین موثرترین پارامتر اندرکنشی خاک-سازه دیوار حائل

Fig.19. Determinant of effective soil-structure interaction parameter for retaining wall flowchart

### ۸- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی پارامترهای موثر در اندرکنش خاک و سازه و تاثیر آن بر پاسخ سازه پرداخته شده است. با توجه به نمودارهای بدست آمده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی مشخص شد که در هر دو نوع تحلیل استاتیکی ناشی از بار ثقلی و تحلیل لرزه‌ای ناشی از زلزله، چگالی خاک پشت دیوار از اهمیت بالایی برخوردار است. در تحلیل استاتیکی با  $2$  برابر شدن میزان چگالی، پاسخ سازه  $1/5$  برابر شده است. در صورتی که با  $2$  برابر شدن میزان چگالی در تحلیل دینامیکی، پاسخ سازه  $2$  برابر می‌شود. این بدان معناست که اولاً پارامتر چگالی خاک (نوع خاک) تاثیر بسزایی بر پاسخ اندرکنشی سازه خواهد داشت. ثانیاً این تاثیر می‌تواند در هنگام وقوع زلزله پر رنگ‌تر و در حدود  $50\%$  بیشتر گردد زیرا افزایش چگالی تاثیر مستقیمی بر افزایش قشار جانبی و نیز افزایش نیروی اینرسی در بار دینامیکی اعمال شده بر دیواره می‌گذارد.

ضریب زاویه اصطکاک خاک و دیوار، پارامتر تاثیر گذار دیگری است که بر پاسخ دیوار تاثیر چشمگیری می‌گذارد. هر چقدر چسبندگی بین دو

- [15] Tajirian, F. (1981). Impedance Matrices and Interpolation Techniques for 3-D Interaction Analysis by the Flexible Volume Method. *Department of civil engineering*. Berkley, University of California. Ph.D.
- [16] SIMULIA (2011). ABAQUS User's Manual.
- [17] Darian, S., Bahrapour, A. and Arabzadeh, H. (2011). comprehensive guidance for ABAQUS software. Tehran, Angizeh. (In Persion).
- [18] Lysmer, J. a. K., R.L (1969). "Finite dynamic model for infinite media." *J. Eng, Mech.* 12(1): 34.
- [19] Mirhosseini, S. M. a. N., M (2004). "Development of a physical model to study the lateral earth pressure under static and cyclic surcharges." *Fanni Technical Journal* 37(1): 15.
- [11] Chin, C. C. (1998). "Substructure Subtraction Method and Dynamic Analysis of Pile Foundation. Department of civil engineering. Berkeley, University of California. Ph.D.
- [12] Waas, G. (1972). Earth vibration effects and abatement for military facilities-analysis method for footing vibrations through layered media. Technical Report 5-71-14. U. S. Army Engineer Waterways Experimental Statio.
- [13] Chen, J. C. (1980). Analysis of Local Variation in Free-Field Seismic Ground Motions. Department of civil engineering. Berkeley, *University of California. Ph.D.*
- [14] Seed, H. B. a. I., I. M. (1969). "The influence of soil condition on ground motion during earthquake." *J. of Soil Mechanics and Foundation* 94(1): 38.

Please cite this article using:

S. Mohammad S. Kolbadi, R. Rasti Ardakani, "Evaluation of Soil-Structure Interaction Parameters in Static and Dynamic Response of the Retaining". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 323-334.

DOI:10.22060/ceej.2016.864

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



