

بررسی عددی رفتار لرزه‌ای سیلوهای بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه

فریبرز ناطقی الهی و منصور یخچالیان^{*۱}

۱. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۰۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۰۵/۱۶)

چکیده -

ABAQUS

واژگان کلیدی :

Numerical Investigation into Seismic Behavior of Reinforced Concrete Silos Considering Granular Material-Structure Interaction

F. Nateghi Alahi and M. Yakhchalian

1. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Abstract: Silos are structures used for storing different types of granular materials. Seismic behavior of reinforced concrete silos is very complex due to nonlinearity of reinforced concrete wall of silo and nonlinear behavior of granular material. In this paper, the effect of granular material-structure interaction is investigated for a reinforced concrete silo by using ABAQUS finite element package. A hypoplastic constitutive model is used for modeling the granular material. After modeling the granular material-structure interaction under seismic excitation, the results obtained are compared with those of models without granular material-structure interaction.

Keywords: Reinforced Concrete Silo, Seismic Behavior, Finite Element Method, Concrete Damaged Plasticity Model, Hypoplasticity, Granular Material-Structure Interaction.

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.yakhchalian@iiees.ac.ir

نوع ماسه به عنوان مصالح ذخیره در داخل سیلو در نظر گرفته شده‌اند. مصالح دانه‌ای با استفاده از اجزای سه بعدی Solid و رفتار آن با استفاده از یک مدل رفتاری هیپوپلاستیک مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی اندرکنش بین دیواره سیلو و مصالح ذخیره شده در داخل سیلو از مدل‌سازی تماس سطح به سطح با در نظر گرفتن قانون اصطکاک کولمب استفاده شده است.

۲- نظریه هیپوپلاستیسته برای مدل‌سازی مصالح

دانه‌ای

هیپوپلاستیسته نوعی از مدل‌های رفتاری غیرخطی است که برای پیش‌بینی رفتار مصالح دانه‌ای ایجاد شده است. ساختار اولیه مدل‌های هیپوپلاستیک در دهه ۱۹۹۰ در دانشگاه کارلسروهه ایجاد شده است. هیپوپلاستیسته ساختاری برای شرح رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای است. قوانین رفتاری هیپوپلاستیک نرخ تغییرات تنش را به صورت تابعی از تنش، نرخ تغییرات کرنش و نسبت تخلخل شرح می‌دهند و برای مدل‌سازی مصالح دانه‌ای غیرچسبنده مناسب هستند. مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف [۹] می‌تواند رفتار غیرخطی مصالح دانه‌ای را به خوبی مدل‌سازی کند ولی برای مدل‌سازی رفتار مصالح دانه‌ای تحت اثر بارگذاری سیکلی ایراداتی دارد. مهمترین کمبود این مدل انباشته شدن بیش از حد تغییرشکل به ازای سیکلهای با تنشهای کم است که رتج‌تینگ^۴ نامیده می‌شود. برای حل این کمبود نی‌مونیس و هرل [۱۰] با معرفی مفهوم کرنش میان دانه‌ای^۵ مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف را توسعه دادند. در این مقاله از مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف با در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه‌ای برای مدل‌سازی مصالح ذخیره شده در داخل سیلو استفاده شده است. در مطالعه‌ای که بر روی رفتار لرزه‌ای سیلوه‌ها انجام شده مسکوریس و هولر [۴] نیز از همین مدل برای مدل‌سازی مصالح ذخیره شده در داخل سیلو تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای استفاده کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند.

سیلوه‌ها سازه‌هایی هستند که برای ذخیره کردن مصالح دانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مناطق زلزله خیز سیلوه‌ها باید برای مقاومت در برابر بارهای ناشی از زلزله طراحی شوند. در طول زلزله دیواره سیلو تنشهای اضافی ناشی از توزیع فشار نامتقارن در سیلو را تجربه می‌کند، به علاوه نیروهای دینامیکی به تراکمتر شدن مصالح دانه‌ای داخل سیلو منجر می‌شوند. در طراحی معمول سیلوه‌ها براساس ACI313 [۱] فشارهای اعمال شده به دیواره ناشی از این اثرات در نظر گرفته نمی‌شوند و ۸۰ درصد وزن مصالح ذخیره شده در داخل سیلو به عنوان وزن مؤثر برای محاسبه بارهای ناشی از زلزله در نظر گرفته می‌شود، ولی قسمت چهارم آیین‌نامه Eurocode 8 [۲] فشارهای افقی ناشی از اثرات زلزله را با استفاده از روابط ساده شده در نظر می‌گیرد. تحقیقات کمی وجود دارند که تلاش کرده‌اند رفتار سیلوه‌ها تحت اثر زلزله را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه مورد بررسی قرار دهند. براون و ایبل [۳] و مسکوریس و هولر [۴] سعی کرده‌اند تا رفتار سیلوه‌ها تحت اثر زلزله را با در نظر گرفتن اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه مورد بررسی قرار دهند. آنها از مدل‌های هیپوپلاستیک^۱ مختلف برای مدل‌سازی مصالح دانه‌ای داخل سیلو استفاده کرده‌اند ولی در تمام این تحقیقات رفتار دیواره سیلو خطی در نظر گرفته شده است. ناطقی الهی و یخچالیان [۵ و ۶] نیز مطالعاتی را در رابطه با اثر زلزله بر سیلوه‌های بتنی انجام داده‌اند. در این مقاله اندرکنش مصالح دانه‌ای و دیواره با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی دیواره سیلو مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره سیلو با استفاده از مدل پلاستیسته خسارت بتن^۲ [۷ و ۸] و اجزای پوسته‌ای مدل‌سازی شده است. رفتار لرزه‌ای مصالح ذخیره شده در داخل سیلو بسیار غیرخطی بوده و شرح رفتار غیرخطی آن بسیار پیچیده است. نظریه هیپوپلاستیسته^۳ نرخ تغییرات تنش را به صورت تابعی از تنش، نرخ تغییرات کرنش و نسبت تخلخل شرح می‌دهد. نظریه هیپوپلاستیسته می‌تواند رفتار غیرخطی مصالح دانه‌ای را مدل‌سازی کند. در این مقاله دو

در معادله بالا T تانسور تنش است.

$$\hat{T}^* = \hat{T} - \frac{1}{3} \hat{I} \quad (9)$$

I تانسور واحد مرتبه دوم است.

$$a = \frac{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin\varphi_c} \quad (10)$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos 3\theta} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi} \quad (11)$$

$$\tan \psi = \sqrt{3} \left\| \hat{T}^* \right\| \quad (12)$$

$$\cos 3\theta = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\hat{T}^{*3})}{[\text{tr}(\hat{T}^{*2})]^{3/2}} \quad (13)$$

در معادلات بالا از انواع ضربهای تانسوری استفاده شده است

به طور مثال $M : D = M_{ijkl} D_{kl}$, $\hat{\delta} \hat{\delta} = \hat{\delta}_{ij} \hat{\delta}_{kl}$,

$$\hat{\delta} : D = \hat{\delta}_{ij} D_{ij}, \quad N \hat{\delta} = N_{ij} \hat{\delta}_{kl}$$

و f_d و f_e توابع پیکنوتروپی هستند.

$$f_e = \left(\frac{e_c}{e} \right)^\beta \quad (14)$$

$$f_d = \left(\frac{e - e_d}{e_c - e_d} \right)^\alpha \quad (15)$$

f_b تابع باروتروپی است.

$$f_b = \frac{h_s}{n} \left(\frac{1 + e_i}{e_i} \right) \left(\frac{e_{i0}}{e_{c0}} \right)^\beta \left(\frac{-\text{tr}T}{h_s} \right)^{1-n} \times \left[3 + a^2 - a\sqrt{3} \left(\frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \right)^\alpha \right]^{-1} \quad (16)$$

سه مقدار نسبت تخلخل مشخصه e_i , e_c و e_d براساس معادله زیر با میانگین فشار کاهش می یابند.

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \exp \left[- \left(\frac{-\text{tr}T}{h_s} \right)^n \right] \quad (17)$$

مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف به ۸ پارامتر نیاز دارد که عبارتند از: φ_c زاویه اصطکاک داخلی بحرانی، e_{c0} حداکثر نسبت تخلخل معمول، e_{d0} حداقل نسبت تخلخل معمول، e_{i0} حداکثر نسبت تخلخل ممکن، h_s سختی دانه ای که یک سختی

رابطه عمومی میان تنش و کرنش در مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف با در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه ای به صورت زیر است.

$$\hat{T} = M : D \quad (18)$$

\hat{T} نرخ تغییرات تنش جاومن، D نرخ تغییرات کرنش و M تانسوری مرتبه چهارم است که بیانگر سختی است. کرنش میان دانه ای $\hat{\delta}$ از انباشته شدن مقادیر $D \Delta t$ به دست می آید و یک تانسور مرتبه دوم است. ρ دامنه نرمال شده کرنش میان دانه ای $\hat{\delta}$ است.

$$\rho = \frac{\|\hat{\delta}\|}{R} \quad (2)$$

$\hat{\delta}$ جهت کرنش میان دانه ای است و به صورت معادله زیر تعریف شده است.

$$\hat{\delta} = \begin{cases} \hat{\delta} / \|\hat{\delta}\| & \text{for } \hat{\delta} \neq 0 \\ 0 & \text{for } \hat{\delta} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

سختی مصالح را می توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد.

$$M = \left[\rho^\lambda m_T + (1 - \rho^\lambda) m_R \right] L + \begin{cases} \rho^\lambda (1 - m_T) L : \hat{\delta} \hat{\delta} + \rho^\lambda N \hat{\delta} & \text{for } \hat{\delta} : D > 0 \\ \rho^\lambda (m_R - m_T) L : \hat{\delta} \hat{\delta} & \text{for } \hat{\delta} : D \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

در معادله بالا L یک تانسور مرتبه چهارم و N یک تانسور مرتبه دوم است. تانسورهای L و N توابعی از تنش و نسبت تخلخل اند.

معادله تغییرات کرنش میان دانه ای به صورت زیر است.

$$\hat{\delta} = \begin{cases} (I - \hat{\delta} \hat{\delta} \rho^{\beta_r}) : D & \text{for } \hat{\delta} : D > 0 \\ D & \text{for } \hat{\delta} : D \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

در معادله بالا I تانسور واحد مرتبه چهارم است.

$$L = f_b f_e \frac{1}{\hat{T} : \hat{T}} (F^2 I + a^2 \hat{T} \hat{T}) \quad (6)$$

$$N = f_d f_b f_e \frac{Fa}{\hat{T} : \hat{T}} (\hat{T} + \hat{T}^*) \quad (7)$$

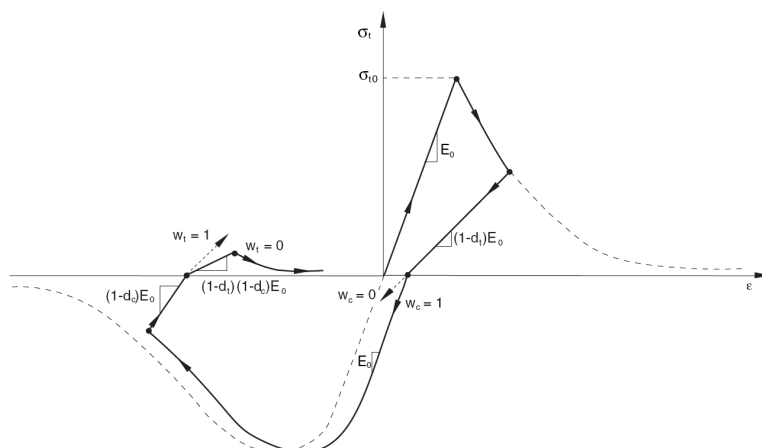
$$\hat{T} = T / \text{tr}T \quad (8)$$

مستقل از فشار است، n یک توان است که در رابطه توانی فشرده شدن متناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد این پارامتر حساسیت مصالح دانه‌ای نسبت به فشار را در نظر می‌گیرد. α و β توانهایی هستند که باید از با استفاده از حداکثر زاویه اصطکاک داخلی سه محوری تعیین شوند. این پارامترها را می‌توان با استفاده از آزمایشهای ساده مکانیک خاک به دست آورد، طریقه به دست آوردن این پارامترها توسط هرل و گودهوس [۱۱] به تفصیل شرح داده شده است. برای پیاده کردن مفهوم کرنش میان دانه‌ای ۵ پارامتر اضافی دیگر نیز مورد نیاز هستند. m_R ، m_T ، R و β_T پارامترهای کرنش میان دانه‌ای هستند. پارامتر R حداکثر کرنش میان دانه‌ای است، ضرایب m_R و m_T ضرایب افزایش سختی به ازای تغییر جهت بارگذاری به اندازه ۱۸۰ درجه و ۹۰ درجه هستند. پارامترهای β_T و β_R برای ملایم کردن تغییرات سختی به کار می‌روند. پارامترهای کرنش میان دانه‌ای تغییر سختی مصالح دانه‌ای با تغییر جهت بارگذاری را نشان می‌دهند، این پارامترها را می‌توان با مقایسه نتایج آزمایشهای تحکیم سیکلی و برش مستقیم سیکلی با نتایج مدلسازی عددی کالیبره کرد.

۳- مدل پلاستیسیته خسارت بتن

مدل پلاستیسیته خسارت بتن برای مدلسازی دیواره سیلو مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل یک مدل خسارت بر پایه پلاستیسیته برای بتن است. این مدل فرض می‌کند که مهمترین مکانیسمهای خرابی برای بتن ترک خوردگی در کشش و خرد شدن در فشارند. این مدل فرض می‌کند که پاسخ بتن تحت اثر کشش و فشار تک محوری با استفاده از پلاستیسیته مبتنی بر خسارت تعریف می‌شود. تحت اثر کشش تک محوری پاسخ تنش-کرنش تا رسیدن به تنش خرابی σ_{t0} از یک رابطه خطی پیروی می‌کند. تنش خرابی متناظر با آغاز ترکهای ریز در بتن است، فراتر از تنش خرابی متناظر با آغاز ترکهای ریز به طور ماکروسکوپی با استفاده از پاسخ تنش-کرنش نرم شونده تعریف می‌شود. هنگامی که بتن از هر نقطه بر روی شاخه نرم

شونده کرنش در منحنی تنش-کرنش باربرداری می‌شود پاسخ باربرداری با کاهش سختی الاستیک بتن تعریف می‌شود. کاهش سختی الاستیک با استفاده از دو پارامتر خسارت در کشش d_t و خسارت در فشار d_c مشخص می‌شود، این پارامترهای خسارت توابعی از کرنشهای پلاستیک هستند. پارامترهای خسارت می‌توانند مقادیری از صفر که بیانگر رفتار بدون خسارت است تا یک که بیانگر از دست دادن کامل سختی است را اختیار کنند. بازبایی سختی یکی از جنبه‌های مهم پاسخ مکانیکی بتن تحت اثر بارگذاری سیکلی است، مشاهدات تجربی در مصالحی مانند بتن نشان می‌دهند هنگامی که بار از کششی به فشاری تغییر می‌کند در اثر بسته شدن ترکها سختی فشاری مقدار قبلی خود را باز می‌یابد. از سوی دیگر هنگامی که بار از فشاری به کششی تغییر می‌کند به دلیل تشکیل ترکهای ریز ناشی از خرد شدگی در بتن سختی کششی مقدار قبلی خود را باز نمی‌یابد. این رفتار بتن که متناظر با $W_t = 0$ و $W_c = 1$ است در شکل (۱) نشان داده شده است. با استفاده از این روش مدلسازی رفتار بتن به صورت مستقل از آرمانتور در نظر گرفته می‌شود. اثرات مربوط به سطح مشترک بتن و آرمانتور از قبیل چسبندگی و لغزش آرمانتور به طور تقریبی با استفاده از قسمت پس از ترک خوردگی منحنی تنش-کرنش بتن در کشش مدلسازی می‌شوند. پارامترهای خسارت d_t و d_c کمیتهایی افزایش یابنده هستند که در هر گام زمانی در طول تحلیل، مقدار آنها به صورت حداکثر مقدار به دست آمده در انتهای گام قبلی و مقدار متناظر آنها با گام فعلی به دست می‌آید. پارامترهای پلاستیسیته مدل پلاستیسیته خسارت بتن عبارت‌اند از: زاویه اتساع^{۱۱}، خروج از مرکزیت پتانسیل جریان^{۱۲} (این پارامتر بیانگر این نکته است که مصالح در محدوده وسیعی از مقادیر فشارهای محدود کننده زاویه اتساع یکسانی دارد افزایش مقدار خروج از مرکزیت پتانسیل جریان انحنای بیشتری را برای پتانسیل جریان فراهم می‌کند که بیانگر این موضوع است که زاویه اتساع با کاهش فشارهای محصور کننده سریعتر افزایش می‌یابد)، $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$ که نسبت مقاومت فشاری بتن تحت



شکل ۱- چرخه بارگذاری تک محوری (کشش-فشار-کشش) با فرض بازیابی سختی $W_t = 0$ و $W_c = 1$

جدول ۱- ابعاد مدل سیلو

۲۰	ارتفاع سیلو (m)
۱۰	قطر داخلی سیلو (m)
۰/۳	ضخامت دیواره سیلو (m)
دولایه $\Phi 18 @ 200 \text{ mm}$	آرماتورهای قائم
دولایه $\Phi 18 @ 150 \text{ mm}$	آرماتورهای حلقوی

۲ نوع ماسه که پارامترهای آنها در ادبیات فنی موجود است برای مدلسازی در نظر گرفته شده‌اند. چگالی هر دو نوع ماسه ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. در مدل‌های A-1 و B-1 مصالح دانه‌ای داخل سیلو با استفاده از مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف با در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه‌ای مدلسازی شده‌اند. در مدل A-1 مصالح دانه‌ای ذخیره شده در سیلو از نوع ماسه هاچ‌استتن و در مدل B-1 مصالح دانه‌ای ذخیره شده در سیلو از نوع ماسه کوارتز در نظر گرفته شده است. در این مدل‌ها از اجزای سه بعدی Solid ۸ گره‌ای، C3D8R برای مدلسازی مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو و از اجزای پوسته‌ای S4R برای مدلسازی دیواره استفاده شده است. برای مدلسازی این مدل‌ها از ۵۵۰ جزء پوسته‌ای و ۱۶۸۰ جزء سه بعدی استفاده شده است. پارامترهای مدل هیپوپلاستیک برای دو نوع ماسه در نظر گرفته شده در

تنش‌های دو محوره مساوی به مقاومت فشاری اولیه بتن می‌باشد، K نسبتی است که معمولاً برای بتن برابر با ۰/۶۶۷ در نظر گرفته می‌شود.

۴- مدلسازی

در این تحقیق ۴ مدل سیلوی بتنی در نظر گرفته شده‌اند، سازه سیلوی در نظر گرفته شده در این ۴ مدل یکسان است. ابعاد سیلو در جدول (۱) ارائه شده‌اند. دو نوع مصالح دانه‌ای، ماسه هاچ‌استتن [۱۳] و ماسه کوارتز [۱۴] به عنوان مصالح ذخیره شده در داخل سیلو در نظر گرفته شده‌اند، ۸ پارامتر اصلی مدل ونولفرزدورف برای انواع مختلف مصالح دانه‌ای از قبیل گندم و شن موجودند ولی ۵ پارامتر اضافی که برای در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه‌ای مورد نیاز هستند در ادبیات فنی برای انواع مختلف ماسه ارائه شده‌اند به همین دلیل

جدول ۲- پارامترهای مدل هیپوپلاستیک ون ولفرزدورف

β	α	e_{i0}	e_{c0}	e_{d0}	n	$(N/m^2) h_s$	φ_c	مصالح دانه‌ای
۱/۵	۰/۲۵	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۵۵	۰/۲۸	1500×10^6	۳۳	ماسه هاچ استتن
۱	۰/۲۲	۱/۰۶	۰/۹۲	۰/۶۳	۰/۳۹	1600×10^6	۲۸/۷	ماسه کوارتز

جدول ۳- پارامترهای مورد نیاز برای مفهوم کرنش میان دانه‌ای

χ	β_T	m_T	m_R	R	مصالح دانه‌ای
۶	۰/۵	۲	۵	۰/۰۰۰۱	ماسه هاچ استتن
۵/۴	۰/۲۶	۲	۲/۱	۰/۰۰۰۱۲۵	ماسه کوارتز

(۴) ارائه شده‌اند. منحنیهای تنش- کرنش تک محوری بتن تحت اثر کشش و فشار و پارامترهای خسارت بتن در کشش و فشار d_t و d_c که به صورت توابعی از کرنش ترک خوردگی و کرنش غیرخطی تعریف شده‌اند در شکل (۳) ارائه شده‌اند. تماس دیواره و کف سیلو با مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو با استفاده از الگوریتم جفت تماسی^{۱۵} در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. قانون اصطکاک کولمب برای مدل‌سازی اصطکاک دیواره و کف سیلو با مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو مورد استفاده قرار گرفته است، ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی ۰/۴ است.

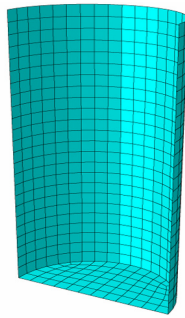
۵- روش تحلیل

تحلیل سازه مورد نظر تحت اثر زلزله ۲ گام اساسی را شامل می‌شود. اولین گام که اعمال بارهای ثقلی به صورت استاتیکی می‌باشد توسط ABAQUS استاندارد انجام شده است. مدل هیپوپلاستیک ون ولفرزدورف با در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه‌ای که به صورت UMAT برای استاندارد ABAQUS [۱۵] نوشته شده است برای مدل‌سازی مصالح ذخیره شده در داخل سیلو در مدل‌های A-1 و B-1 مورد استفاده قرار گرفته است. پس از اعمال بارهای ثقلی شتاب زلزله به سیلو اعمال شده است، در اعمال زلزله به سیلو به دلیل رفتار غیرخطی سازه و مصالح دانه‌ای داخل سیلو باید تحلیل دینامیکی با انتگرال‌گیری مستقیم^{۱۶} مورد استفاده قرار گیرد. روشهای

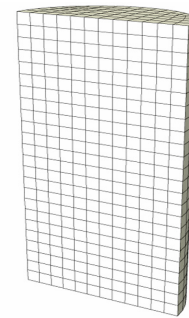
جدول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند، نسبت تخلخل اولیه در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل برای هر دو نوع ماسه برابر با ۰/۷ است. در مدل‌های A-2 و B-2 از اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف نظر شده بدین معنی که مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو مدل‌سازی نشده‌اند و ۸۰ درصد جرم مصالح دانه‌ای درون سیلو به صورت یکنواخت به دیواره سیلو اعمال شده است، برای مدل‌سازی این مدلها از ۵۵۰ جزء پوسته‌ای S4R استفاده شده است. فشارهای جانبی و بارهای قائم ناشی از اصطکاک نیز در این مدلها براساس ACI 313 [۱] به دیواره سیلو اعمال شده‌اند. در تمامی مدلها دیواره سیلو با استفاده از مدل پلاستیسیته خسارت بتن که در نرم‌افزار ABAQUS [۱۴] موجود است مدل‌سازی شده است، عملکرد کف سیلو به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. آرماتورهای حلقوی و قائم به صورت لایه‌های آرماتور تک محوری در اجزای پوسته‌ای در نظر گرفته شده‌اند. مقاومت تسلیم کششی آرماتورها ۴۰۰ مگاپاسکال، مقاومت نهایی آنها ۶۰۰ مگاپاسکال و کرنش کششی نهایی آنها برابر با ۰/۱۴ در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته آرماتورها برابر با 2×10^5 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. برای کاهش زمان محاسبات فقط نیمی از سیلو مدل شده و شرایط مرزی تقارن در قسمت مرکزی سیلو و مصالح دانه‌ای داخل سیلو اعمال شده‌اند. مش بندی مدل‌های سیلو و مصالح دانه‌ای مدل‌سازی شده در مدل‌های A-1 و B-1 در شکل (۲) نشان داده شده است. پارامترهای پلاستیسیته مدل پلاستیسیته خسارت بتن در جدول

جدول ۴- پارامترهای پلاستیسیته مدل پلاستیسیته خسارت بتن

زاویه اتساع	خروج از مرکزیت پتانسیل جریان	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	K
۲۵	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷



اجزای پوسته‌ای ۴ گره‌ای S4R مورد استفاده قرار گرفته در تمامی مدلها



اجزای سه بعدی ۸ گره‌ای C3D8R مورد استفاده قرار گرفته در مدل‌های A-1 و B-1

شکل ۲- مش بندی اجزای محدود سیلو و مصالح دانه‌ای

آنالیز دینامیکی ضمنی مشکل است. روش تحلیل دینامیکی صریح از لحاظ محاسباتی برای تحلیل رخدادهای بسیار ناپیوسته مانند مسائلی که تماس بین دو جسم و مصالح با رفتار غیرخطی زیاد را شامل می‌شوند مؤثر است. عملگر تفاضلات مرکزی به صورت شرطی پایدار است و حد پایداری این عملگر با گام زمانی پایدار بدون در نظر گرفتن میرایی بر حسب بالاترین فرکانس سیستم از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (18)$$

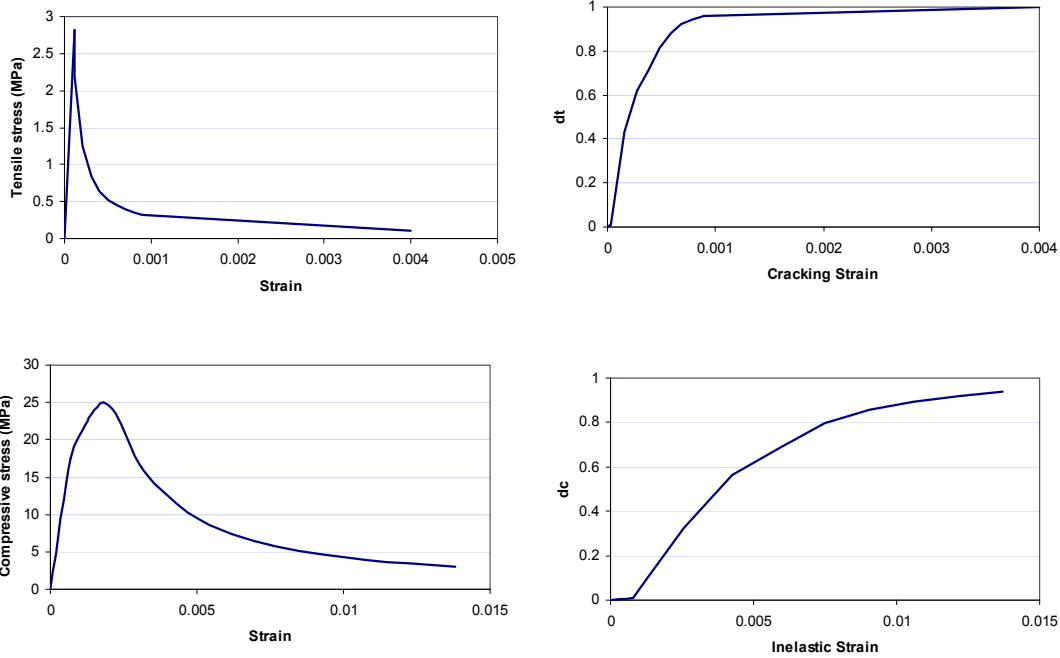
با در نظر گرفتن میرایی گام زمانی پایدار از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi_{\max}^2} - \xi_{\max}) \quad (19)$$

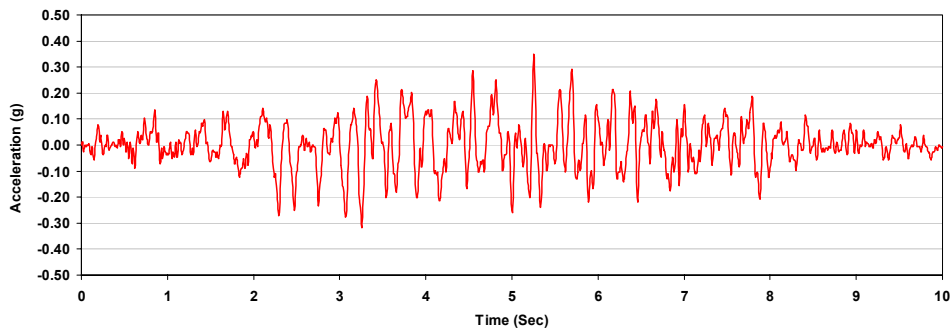
ξ_{\max} میرایی مودی است که بیشترین فرکانس را دارد.

با توجه به موارد شرح داده شده ABAQUS صریح برای اعمال زلزله به سیلو در گام دوم انتخاب شده است. بنابراین تحلیل با استفاده از حالت نهایی مدل تحت اثر بارهای ثقلی در

ضمنی^{۱۷} و صریح^{۱۸} دو روش اصلی برای انتگرال‌گیری هستند. در هنگام استفاده از روش ضمنی در صورتی که معادلات تا حد زیادی غیرخطی باشند فرایند حل معادلات غیرخطی از لحاظ محاسباتی پرهزینه است و ممکن است یافتن حل برای معادلات بسیار مشکل باشد. روش دینامیکی صریح تعداد زیادی از گامهای زمانی کوچک را به طور مؤثر مورد استفاده قرار می‌دهد. در این روش از یک قانون انتگرال‌گیری زمانی تفاضلات مرکزی صریح^{۱۹} استفاده می‌شود و هر گام نسبتاً کم هزینه است زیرا نیازی به حل مجموعه‌ای از معادلات به طور همزمان نیست و به علاوه نیازی نیست که ماتریسهای سختی مماسی تشکیل شوند. عملگر تفاضلات مرکزی صریح معادلات تعادل دینامیکی را در آغاز گام زمانی t ارضا می‌کند، شتابهای محاسبه شده در زمان t برای پیش بردن حل مقادیر سرعت در زمان t+Δt/2 و حل مقادیر تغییر مکان در زمان t+Δt مورد استفاده قرار می‌گیرند. حل مسائلی که تا حد زیادی غیرخطی هستند و تماس بین دو جسم را شامل می‌شوند با استفاده از



شکل ۳- منحنیهای تنش- کرنش بتن در کشش و فشار و پارامترهای خسارت در کشش و فشار d_t و d_c

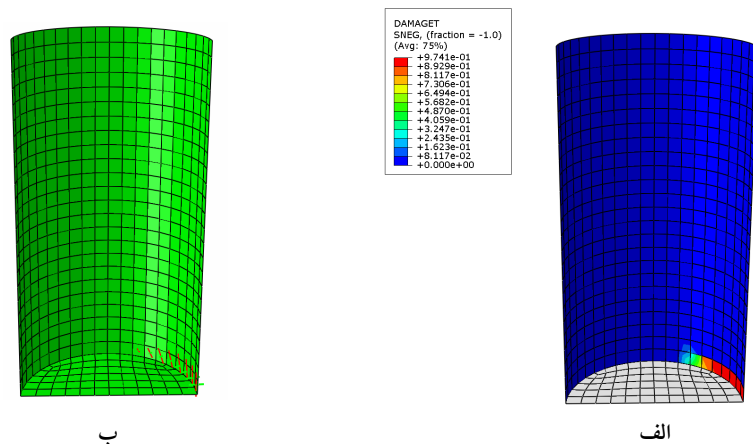


شکل ۴- شتاب نگاشت زلزله اعمال شده به مدل‌های سیلو

۶- نتایج تحلیل

برای بررسی نتایج تحلیل، خسارت در کشش و الگوی ترک خوردگی در هر مدل در قسمتهای بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. براساس آنچه که توسط لوبلاینر [۸] بیان شده برای مشاهده ترکها فرض شده است که ترک خوردگی در نقاطی آغاز می‌شود که کرنش پلاستیک معادل کششی

ABAQUS صریح آغاز شده است. برای مدلسازی مصالح ذخیره شده در سیلو در ABAQUS صریح، سابروتین VUMAT که برای تعریف رفتار مصالح تعریف شده توسط کاربر به کار می‌رود برای مدل هیپوپلاستیک ونولفرزدورف با در نظر گرفتن مفهوم کرنش میان دانه‌ای نوشته شده است. شتابنگاشت زلزله اعمال شده به مدل‌های سیلو در شکل (۴) نشان داده شده است. حداکثر مقدار شتاب در شتابنگاشت اعمال شده $0.35g$ است.



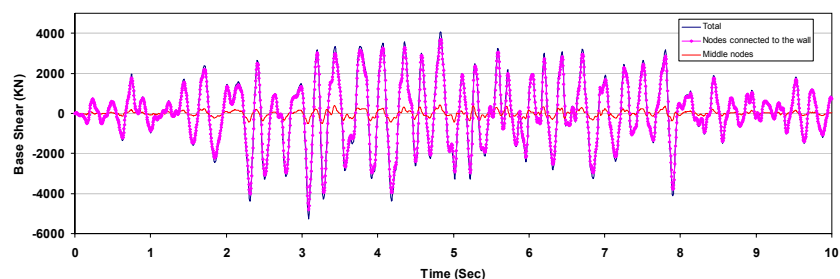
شکل ۵- الف) خسارت در کشتش در مدل A-1 ب) جهت بردارهای عمود بر صفحه ترکها در مدل A-1

شده‌اند زیرا زاویه بردار عمود بر صفحه ترکها از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه نسبت به افق تغییر کرده است. تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل A-1 در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل تاریخچه زمانی برش پایه کل سیلو ارائه شده است، برش پایه کل از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو و با نظر گرفتن نیمی از سیلو محاسبه شده است. علاوه بر برش پایه کل، مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز به‌طور جداگانه در این شکل ارائه شده است، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود قسمتی از برش پایه کل مربوط به عکس‌العمل گره‌های میانی موجود در کف سیلو است که قسمت عمده آن برش پایه منتقل شده از طریق اصطکاک موجود میان مصالح دانه‌ای و کف سیلو می‌باشد. مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز تقریباً برابر با برش پایه منتقل شده از طریق دیواره سیلو است. در این مدل حداکثر برش پایه به‌دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو ۱۰/۷ درصد حداکثر برش پایه به‌دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره است. این مقادیر

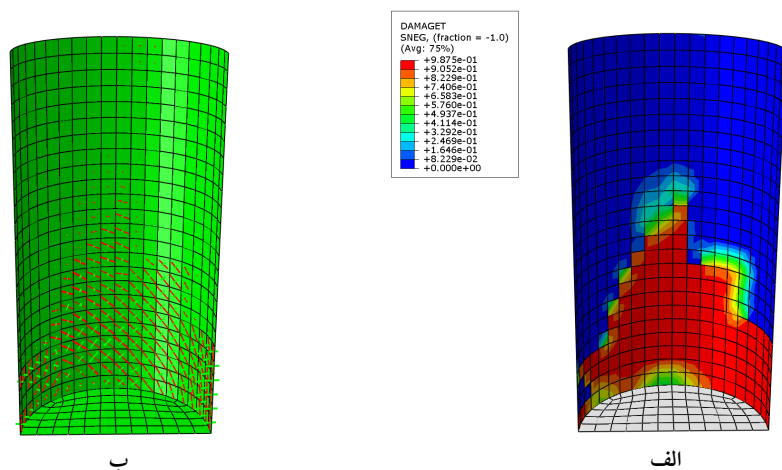
بزرگتر از صفر بوده و حداکثر کرنش با جهت حداکثر کرنش پلاستیک اصلی فرض شده است. تاریخچه زمانی برش پایه نیز برای تمامی مدلها ارائه شده است. زمان تحلیل مدلهایی که در آنها اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه در نظر گرفته شده است تقریباً ۸۱۷ دقیقه است در حالی که زمان تحلیل مدلهایی که در آنها اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف‌نظر شده است تقریباً ۸۳ دقیقه است.

۶-۱-۱ مدل A-1

در این مدل مصالح دانه‌ای ذخیره شده در سیلو از نوع ماسه هاج‌استتن است. خسارت در کشتش در این مدل در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود خسارت در کشتش فقط در قسمت پایینی دیواره سیلو رخ داده است. جهت بردارهای عمود بر صفحات ترک در شکل (۵-ب) نشان داده شده است، خطوط قرمز نشان داده شده در شکل بردارهای عمود بر سطح ترکها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترکهای خمشی در پایتترین قسمت دیواره سیلو نزدیک محور تقارن تشکیل شده‌اند و با حرکت در امتداد محیط ترکهای تشکیل شده در پایتترین قسمت دیواره سیلو به ترکهای برشی تبدیل



شکل ۶- تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل A-1



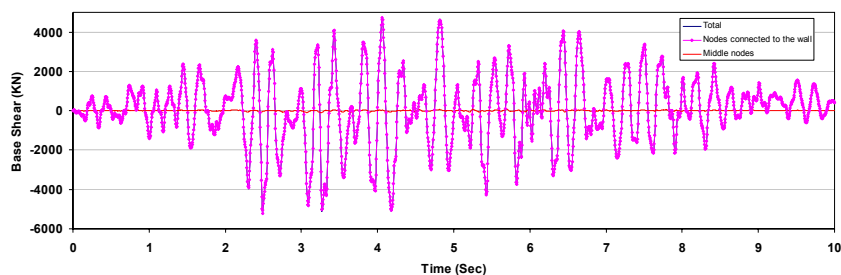
شکل ۷- الف) خسارت در کشش در مدل A-2 ب) جهت بردارهای عمود بر صفحه ترکها در مدل A-2

دیواره سیلو در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته است. جهت بردارهای عمود بر صفحات ترک در شکل (۷-ب) نشان داده شده است، خطوط قرمز نشان داده شده در شکل بردارهای عمود بر سطح ترکها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترکهای خمشی در پایینترین قسمت دیواره سیلو نزدیک محور تقارن تشکیل شده‌اند و با حرکت دیواره محیط ترکهای تشکیل شده در پایینترین قسمت دیواره سیلو به ترکهای برشی تبدیل شده‌اند به علاوه ترکهای برشی در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته‌اند. تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل A-2 در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل تاریخچه زمانی برش پایه کل سیلو ارائه شده است، برش پایه کل از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی

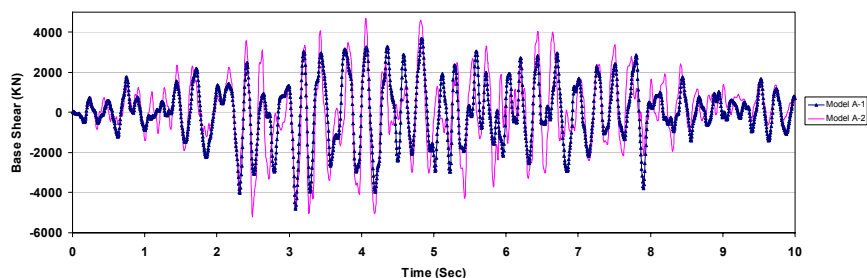
حداکثر برش پایه که نسبت آنها به دست آمده است در یک زمان رخ نداده‌اند.

۶-۲- مدل A-2

در این مدل از اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف‌نظر شده و ۸۰ درصد جرم مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو به‌طور یکنواخت به دیواره سیلو اعمال شده است. برای محاسبه فشارهای استاتیکی مصالح ذخیره شده در سیلو، مصالح دانه‌ای از نوع ماسه‌هاچ استتن در نظر گرفته شده است. خسارت در کشش در این مدل در شکل (۷-الف) نشان داده شده است، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود خسارت در کشش علاوه بر قسمت پایینی



شکل ۸- تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل A-2



شکل ۹- مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو در مدل‌های A-1 و A-2

کشش نیز فقط در قسمت پایینی سیلو رخ داده است این در حالی است که در مدل A-2 که در آن اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف‌نظر شده است ترکها و خسارت در کشش در ارتفاع سیلو نیز گسترش پیدا کرده‌اند. در شکل (۹) مقایسه‌ای میان تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های موجود در کف سیلو که به دیواره سیلو متصل هستند (تقریباً برش پایه منتقل شده از سوی دیواره سیلو) برای مدل‌های A-1 و A-2 انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود حداکثر برش پایه منتقل شده از سوی دیواره در مدل A-2 بیشتر از مدل A-1 است.

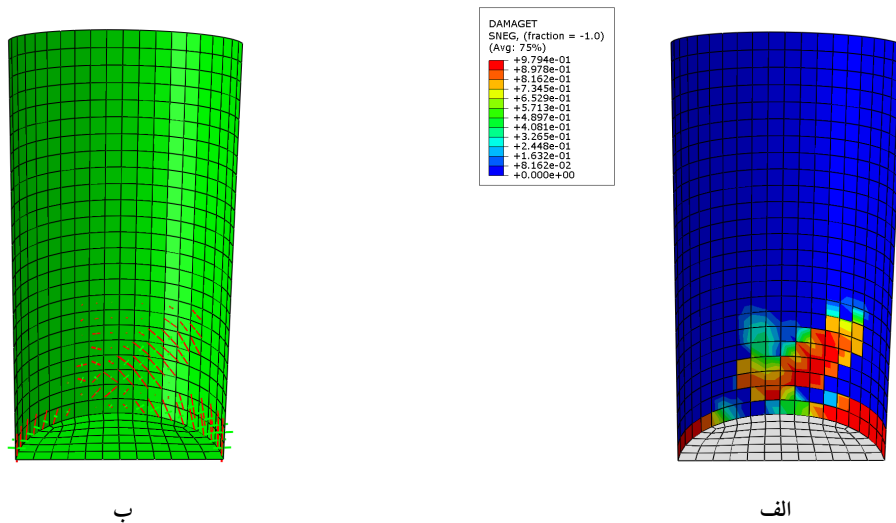
۴-۶- مدل B-1

در این مدل مصالح دانه‌ای ذخیره شده در سیلو از نوع ماسه کوارتز است. خسارت در کشش در این مدل در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل

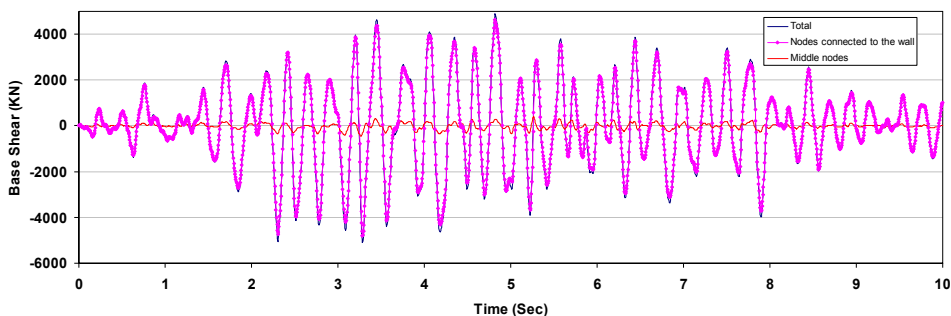
موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو و با در نظر گرفتن نیمی از سیلو محاسبه شده است. علاوه بر برش پایه کل مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز به‌طور جداگانه در این شکل ارائه شده است، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود قسمتی از برش پایه کل مربوط به عکس‌العمل گره‌های میانی موجود در کف سیلو است و در این مدل که در آن اندرکنش مصالح ذخیره شده و دیواره سیلو مدلسازی نشده است بسیار ناچیز بوده و تنها مربوط به جرم کف سیلو است در نتیجه مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو تقریباً برابر با برش پایه کل سیلو است.

۳-۶- مقایسه‌ای میان مدل‌های A-1 و A-

همان‌گونه که در قسمتهای قبلی شرح داده شد در مدل A-1 که اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه را در نظر می‌گیرد ترکها فقط در قسمت پایینی دیواره سیلو رخ داده‌اند و خسارت در



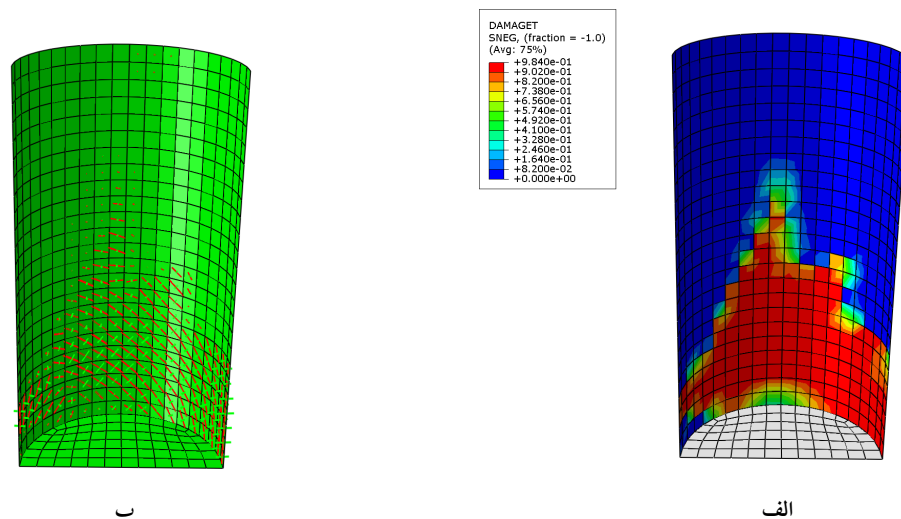
شکل ۱۰- الف) خسارت در کشش در مدل B-1 ب) جهت بردارهای عمود بر صفحه ترکها در مدل B-1



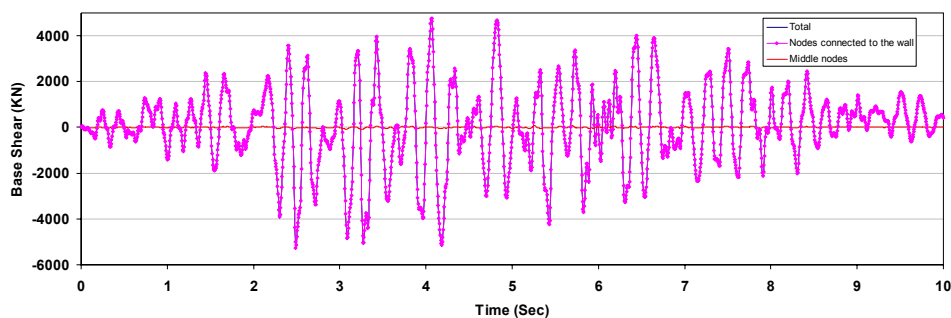
شکل ۱۱- تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل B-1

شکل تاریخچه زمانی برش پایه کل سیلو ارائه شده است، برش پایه کل از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو و با در نظر گرفتن نیمی از سیلو محاسبه شده است. علاوه بر برش پایه کل، مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز به‌طور جداگانه در این شکل ارائه شده است، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود قسمتی از برش پایه کل مربوط به عکس‌العمل گره‌های میانی موجود در کف سیلو است که قسمت عمده آن برش پایه منتقل شده از طریق اصطکاک موجود میان مصالح دانه‌ای و کف سیلو است. مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز

مشاهده می‌شود، خسارت در کشش علاوه بر قسمت پایینی دیواره در ارتفاع سیلو نیز گسترش پیدا کرده است. جهت بردارهای عمود بر صفحات ترک در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است، خطوط قرمز نشان داده شده در شکل بردارهای عمود بر سطح ترکها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترکهای خمشی در پایینترین قسمت دیواره سیلو نزدیک محور تقارن تشکیل شده‌اند و با حرکت در امتداد محیط ترکهای تشکیل شده در پایینترین قسمت دیواره سیلو به ترکهای برشی تبدیل شده‌اند به علاوه ترکهای برشی در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته‌اند. تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل B-1 در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این



شکل ۱۲- الف) خسارت در کشش در مدل B-2 ب) جهت بردارهای عمود بر صفحه ترکها در مدل B-2



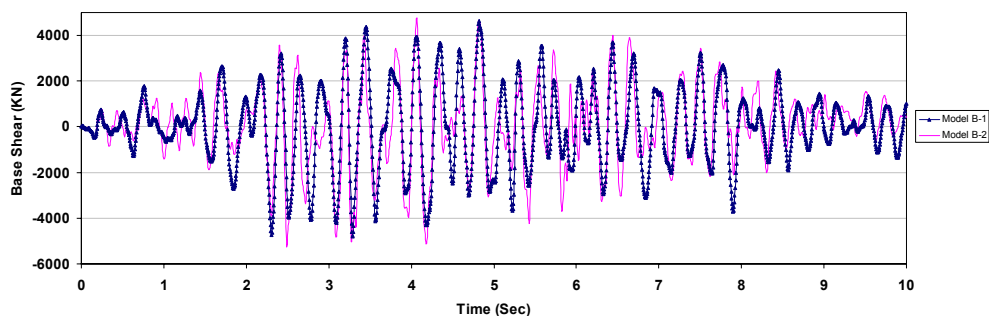
شکل ۱۳- تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل B-2

کوارتز در نظر گرفته شده است. خسارت در کشش در این مدل در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود خسارت در کشش علاوه بر قسمت پایینی دیواره سیلو در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته است. جهت بردارهای عمود بر صفحات ترک در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است، خطوط قرمز نشان داده شده در شکل بردارهای عمود بر سطح ترکها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ترکهای خمشی در پایتترین قسمت دیواره سیلو نزدیک محور تقارن تشکیل شده‌اند و با حرکت در امتداد محیط ترکهای تشکیل شده در پایتترین قسمت دیواره سیلو به ترکهای برشی تبدیل شده‌اند به علاوه ترکهای برشی در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته‌اند. تاریخچه زمانی برش پایه برای مدل B-2 در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این شکل

تقریباً برابر با برش پایه منتقل شده از طریق دیواره سیلو است. در این مدل حداکثر برش پایه به‌دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو ۹/۳ درصد حداکثر برش پایه به‌دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره است. این مقادیر حداکثر برش پایه که نسبت آنها به‌دست آمده است در یک زمان رخ نداده‌اند.

۵-۶- مدل B-2

در این مدل از اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف‌نظر شده و ۸۰ درصد جرم مصالح دانه‌ای ذخیره شده در داخل سیلو به‌طور یکنواخت به دیواره سیلو اعمال شده است. برای محاسبه فشارهای استاتیکی مصالح ذخیره شده در سیلو، مصالح دانه‌ای از نوع ماسه



شکل ۱۴- مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو در مدل‌های B-1 و B-2

مجموع عکس‌العملهای گره‌های موجود در کف سیلو که به دیواره سیلو متصل هستند (تقریباً برش پایه منتقل شده از سوی دیواره سیلو) برای مدل‌های B-1 و B-2 انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود حداکثر برش پایه منتقل شده از سوی دیواره در مدل B-2 بیشتر از مدل B-1 است.

۶-۷- بررسی اثر نوع ماسه بر خسارت ایجاد شده در

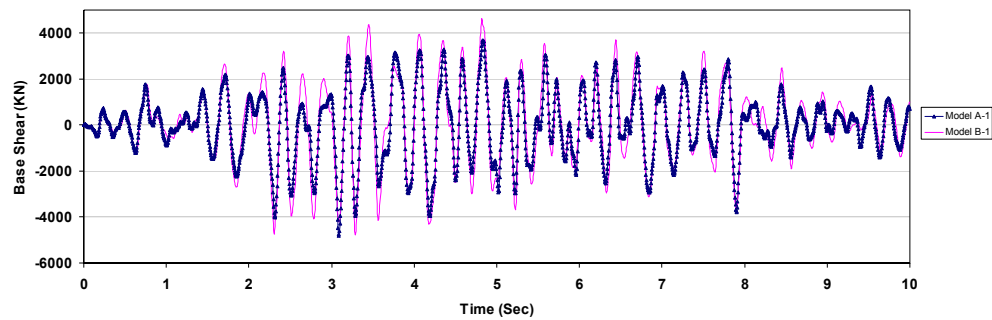
مدل‌های A-1 و B-1

همان‌گونه که از مقایسه شکل‌های (۵-الف) و (۱۰-الف) مشخص است در مدل A-1 که در آن مصالح دانه‌ای از نوع ماسه هاج استن در نظر گرفته شده خسارت در کشش کمتر از مدل B-1 است که در آن مصالح دانه‌ای از نوع ماسه کوارتز در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۵) مقایسه‌ای میان تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العملهای گره‌های موجود در کف سیلو که به دیواره سیلو متصل هستند (تقریباً برش پایه منتقل شده از سوی دیواره سیلو) برای مدل‌های A-1 و B-1 انجام شده است. حداکثر برش پایه در مدل A-1 برابر با ۴۸۱۴ کیلو نیوتن و در مدل B-1 برابر با ۴۷۸۸ کیلو نیوتن است ولی همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود قدر مطلق مقادیر اکسترم برش پایه در مدل B-1 در اکثر نقاط از مقدار متناظر در مدل A-1 بیشتر است. همان‌گونه که پیشتر ذکر شد پارامتر n حساسیت مصالح دانه‌ای نسبت به فشار را در نظر می‌گیرد. در مدل A-1 این پارامتر برابر با ۰/۲۸ و در مدل

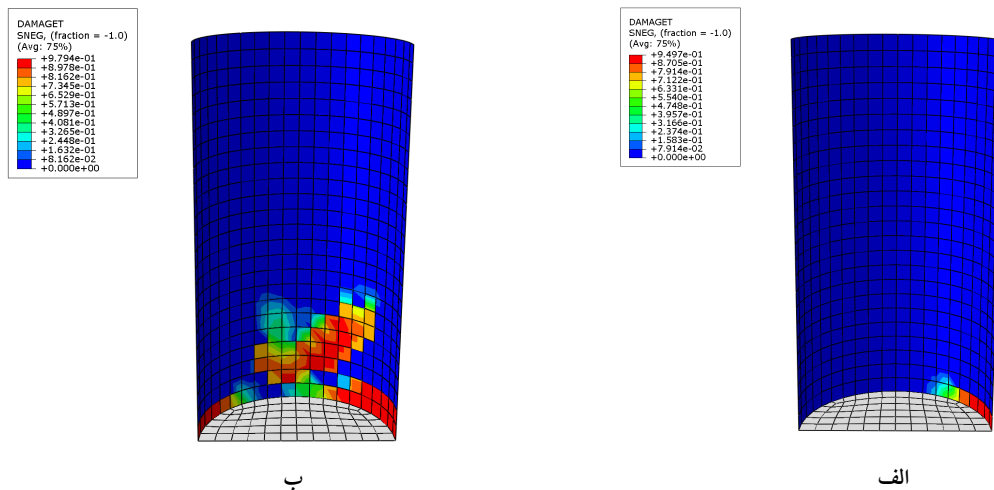
تاریخچه زمانی برش پایه کل سیلو ارائه شده است. برش پایه کل از مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو و با در نظر گرفتن نیمی از سیلو محاسبه شده است. علاوه بر برش پایه کل، مجموع عکس‌العملهای گره‌های میانی موجود در کف سیلو و گره‌های متصل به دیواره سیلو نیز به طور جداگانه در این شکل ارائه شده است، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود قسمتی از برش پایه کل مربوط به عکس‌العمل گره‌های میانی موجود در کف سیلو است و در این مدل که در آن اندرکنش مصالح ذخیره شده و دیواره سیلو مدلسازی نشده است بسیار ناچیز بوده و تنها مربوط به جرم کف سیلو است در نتیجه مجموع عکس‌العملهای گره‌های متصل به دیواره سیلو تقریباً برابر با برش پایه کل سیلو است.

۶-۶- مقایسه‌ای میان مدل‌های B-1 و B-2

همان‌گونه که در قسمتهای قبلی شرح داده شد در مدل B-1 که اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه را در نظر می‌گیرد علاوه بر ترک‌هایی که در قسمت پایینی دیواره سیلو رخ داده‌اند ترکها در ارتفاع سیلو نیز گسترش یافته‌اند و خسارت در کشش نیز علاوه بر قسمت پایینی سیلو در ارتفاع سیلو گسترش یافته است. در مدل B-2 که در آن از اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف نظر شده است ترکها و خسارت در کشش در ارتفاع سیلو گسترش پیدا کرده‌اند. در شکل (۱۴) مقایسه‌ای میان تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از



شکل ۱۵- مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العمل‌های گره‌های متصل به دیواره سیلو در مدل‌های A-1 و B-1

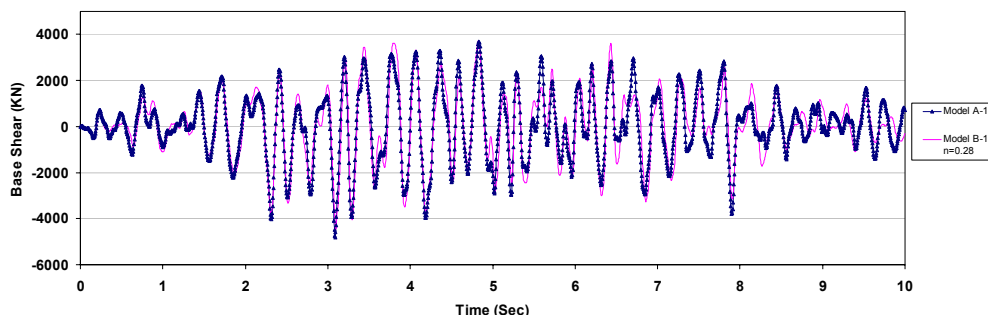


شکل ۱۶- الف) خسارت در کشش در مدل B-1 با فرض $n = 0/28$ ب) خسارت در کشش در مدل B-1 با فرض $n = 0/39$

سیلو رخ داده است. برای بررسی اثر پارامتر n بر خسارت وارده، خسارت در کشش در مدل B-1 با فرض $n = 0/39$ که پیشتر در شکل (۱۰-الف) ارائه شده است دوباره در شکل (۱۶-ب) نشان داده شده است.

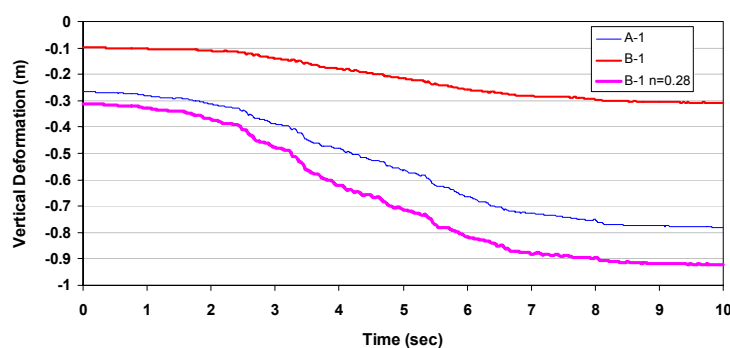
همان‌گونه که در شکل (۱۶) نشان داده شده است با کاهش مقدار پارامتر n از $0/39$ به $0/28$ میزان خسارت در کشش نیز کاهش یافته است و خسارت در کشش در مدل B-1 با فرض $n = 0/28$ به خسارت در کشش در مدل A-1، شکل (۵-الف) شبیه است. لازم به ذکر است در مدل A-1 که در آن مصالح دانه‌ای از نوع ماسه هاچ استتن در نظر گرفته

B-1 این پارامتر برابر با $0/39$ در نظر گرفته شده است، جدول (۲). برای بررسی اثر نوع ماسه در مدل B-1 که خسارت بیشتری در آن رخ داده است پارامتر n برابر با آنچه که در مدل A-1 در نظر گرفته شده است یعنی $0/28$ فرض شده و در حالی که سایر پارامترهای ماسه کوارتز همانند آنچه که در جدول (۲) ارائه شده است تغییری نکرده‌اند، تحلیل برای مدل B-1 با فرض $n = 0/28$ تکرار شده است. خسارت در کشش در مدل B-1 با فرض $n = 0/28$ در شکل (۱۶-الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با فرض $n = 0/28$ خسارت در کشش فقط در قسمت پایینی دیواره



شکل ۱۷- مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العمل‌های گره‌های متصل به دیواره سیلو در مدل A-1 و مدل

B-1 با فرض $n = 0.28$



شکل ۱۸- تغییر شکل قائم گره انتخاب شده در قسمت بالایی مصالح دانه‌ای در اثر اعمال زلزله

شده است $n = 0.28$ است. در شکل (۱۷) تاریخچه زمانی برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العمل‌های گره‌های موجود در کف سیلو که به دیواره سیلو متصل هستند برای مدل A-1 و مدل B-1 با فرض $n = 0.28$ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با فرض $n = 0.28$ در مدل B-1 اختلاف تاریخچه زمانی برش پایه در مدل‌های A-1 و B-1 در مقایسه با شکل (۱۵) بسیار کمتر شده است.

۸-۶- متراکم شدن مصالح دانه‌ای

پس از اعمال زلزله مصالح دانه‌ای موجود در داخل سیلو متراکم می‌شوند. شکل (۱۸) تغییر شکل قائم گره موجود در وسط سیلو در قسمت بالایی مصالح دانه‌ای را در اثر اعمال زلزله نشان می‌دهد، همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود مصالح دانه‌ای موجود در مدل A-1 در اثر اعمال زلزله بیشتر از

مصالح دانه‌ای موجود در مدل B-1 متراکم شده‌اند. حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل A-1 در اثر زلزله برابر با 0.51 متر و حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل B-1 در اثر زلزله برابر با 0.21 متر است، ولی هنگامی که در مدل B-1 پارامتر n برابر با آنچه که در مدل A-1 در نظر گرفته شده است یعنی 0.28 فرض شده در حالی که سایر پارامترهای ماسه کوارتز همانند آنچه که در جدول (۲) ارائه شده است تغییری نکرده‌اند مصالح دانه‌ای موجود در مدل B-1 بیشتر از مصالح دانه‌ای موجود در مدل A-1 متراکم شده‌اند. در این حالت حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل B-1 در اثر زلزله برابر با 0.61 متر است که نشان می‌دهد با تغییر پارامتر n از 0.39 به 0.28 تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در اثر زلزله $2/9$ برابر شده است. به علاوه با مقایسه شکلهای (۵-الف)، (۱۰-الف) و (۱۶) که خسارت در کشش را

برای مدل‌های A-1 و B-1 نشان می‌دهند می‌توان دید که مدل B-1 که در آن $n = 0/39$ است آسیب بیشتری دیده است به عبارت دیگر در مدل B-1 که ماسه موجود در آن قابلیت متراکم شدن کمتری دارد خسارت در کشش بیشتر است، ولی با تغییر پارامتر n به $0/28$ در مدل B-1 ماسه بیشتر متراکم شده و خسارت در کشش نیز کاهش یافته است.

۷- نتیجه‌گیری

- در مدل‌هایی که اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه را در نظر می‌گیرند مشخصات مصالح ذخیره شده در سیلو در میزان خسارت ایجاد شده در کشش تأثیرگذار است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند پارامتر n که حساسیت مصالح دانه‌ای نسبت به فشار را بیان می‌کند در میزان خسارت ایجاد شده در مدل تأثیرگذار است و اگر مقدار n افزایش یابد خسارت در کشش نیز افزایش می‌یابد.
- در مدل‌های A-2 و B-2 که از اثر اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه صرف‌نظر شده و 80% درصد جرم مصالح دانه‌ای به صورت یکنواخت به دیواره سیلو اعمال شده است، گسترش خسارت در کشش بیشتر از مدل‌های دیگر است. به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن 80% درصد جرم مصالح دانه‌ای به عنوان جرم مؤثر برای بررسی خسارت در سیلوهای در نظر گرفته شده در این مقاله محافظه‌کارانه است ولی محافظه‌کارانه بودن و یا نبودن این فرض به مقدار پارامتر n در نظر گرفته شده برای مصالح و همچنین نسبت ارتفاع به قطر سیلو بستگی دارد.
- در تمامی مدل‌ها در اثر اعمال زلزله به سیلوی بتنی، خسارت در کشش از پایتترین قسمت دیواره سیلو آغاز شده و به جز مدل A-1 و مدل B-1 با فرض $n = 0/28$ در بقیه مدل‌ها در ارتفاع سیلو گسترش یافته است.
- در اثر اعمال زلزله به سیلو ارتفاع مصالح ذخیره شده در داخل سیلو کاهش می‌یابد و مصالح دانه‌ای ذخیره شده در

سیلو متراکمتر می‌شوند. حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل A-1 در اثر زلزله برابر با $0/51$ متر و حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل B-1 در اثر زلزله برابر با $0/21$ متر است، ولی هنگامی که در مدل B-1 پارامتر n برابر با آنچه که در مدل A-1 در نظر گرفته شده است یعنی $0/28$ فرض شده مصالح دانه‌ای موجود در مدل B-1 بیشتر از مصالح دانه‌ای موجود در مدل A-1 متراکم شده‌اند. در این حالت حداکثر تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در مدل B-1 در اثر زلزله برابر با $0/61$ متر است که نشان می‌دهد با تغییر پارامتر n از $0/39$ به $0/28$ تغییر مکان قائم نقطه انتخاب شده در اثر زلزله $2/9$ برابر شده است.

- در مدل B-1 کاهش مقدار پارامتر n از $0/39$ به $0/28$ علاوه بر تراکم بیشتر مصالح موجب کاهش خسارت ایجاد شده در کشش نیز شده است.
- در تمامی مدل‌ها در اثر اعمال زلزله به سیلوی بتنی، در ابتدا ترک‌های خمشی در پایتترین قسمت دیواره سیلو رخ داده‌اند و با حرکت در امتداد محیط ترک‌ها به ترک‌های برشی تبدیل شده‌اند. در تمامی مدل‌هایی که در آنها خسارت در کشش در ارتفاع سیلو گسترش یافته ترک‌های برشی در ارتفاع سیلو گسترش یافته‌اند.
- به دلیل وجود اصطکاک میان کف سیلو و مصالح ذخیره شده مقداری از برش پایه به جای انتقال از طریق دیواره سیلو از طریق اصطکاک میان مصالح دانه‌ای و کف سیلو به کف سیلو منتقل می‌شود. در مدل A-1 حداکثر برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العمل‌های گره‌های میانی موجود در کف سیلو $10/7\%$ درصد حداکثر برش پایه به دست آمده از مجموع عکس‌العمل‌های گره‌های متصل به دیواره است در مدل B-1 این نسبت برابر با $9/3\%$ درصد است. لازم به ذکر است این مقادیر حداکثر برش پایه که نسبت آنها به دست آمده است در یک زمان رخ نداده‌اند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای تامین امکانات مالی و آزمایشگاهی تشکر و

قدردانی می‌شود. مقاله ارائه شده نتیجه یک پروژه تحقیقاتی مصوب در این پژوهشگاه می‌باشد.

واژه‌نامه

- | | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| 1. hypoplastic | 8. objective Jaumann stress rate | 15. contact pair |
| 2. concrete damaged plasticity model | 9. tension damage parameter | 16. direct integration dynamic analysis |
| 3. hypoplasticity | 10. compression damage parameter | 17. implicit method |
| 4. ratcheting | 11. dilation angle | 18. explicit method |
| 5. intergranular strain | 12. flow potential eccentricity | 19. explicit central-difference time integration |
| 6. pycnotropy | 13. hochstetten | |
| 7. barotropy | 14. quart ₃ | |

مراجع

1. American Concrete Institute, "ACI 313, Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular materials," 1997
2. European Committee for Standardization, "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines," 2006
3. Braun, A., and Eibl, J., "Silo Pressures Under Earthquake Loading," *X International Conference on Reinforced and Post-tensioned Concrete Silo and Tanks, Cracow, Poland*, 1995
4. Holler, S., and Meskouris, K., "Granular Material Silos Under Dynamic Excitation: Numerical Simulation and Experimental Validation," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, pp. 1573-1579, 2006
5. Nateghi, F., and Yakhchalian, M., "Seismic Vulnerability Assessment of a Reinforced Concrete Silo," *In Proceedings of 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Macedonia, 2010
6. Nateghi, F., Yakhchalian, M., "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Silos Considering Granular Material-Structure Interaction," *In Proceedings of Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Hong Kong, 2011
7. Lee, J., and Fenves, G. L., "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, pp. 892-900, 1998
8. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E., "A Plastic-Damage Model for Concrete," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, pp. 299-329, 1989
9. Von Wolffersdorff, P.A., "A Hypoplastic Relation for Granular Materials with a Predefined Limit State Surface," *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 1, pp. 251-271, 1996
10. Niemunis, A., and Herle, I., "Hypoplastic Model for Cohesionless Soils with Elastic Strain Range," *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 2, pp. 279-299, 1997
11. Herle, I., and Gudehus, G., "Determination of Parameters of a Hypoplastic Constitutive Model from Properties of Grain Assemblies," *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 4, pp. 461-486, 1999.
12. Masin, D., "PLAXIS implementation of Hypoplasticity," *Plaxis bv, Delft*, 2010
13. Wagner, R., "Seismically Loaded Bulk Silos," Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, Faculty of Civil Engineering (In German), 2002
14. Dassault Systèmes, "ABAQUS User's Manual," Version 6.9, 2009
15. www.soilmodels.info