

مدلسازی آزمایشگاهی - عددی رفتار لرزه ای شیب های ماسه ای خشک مسلح شده با ردیف شمع

حسن شرفی^{۱*}، یزدان شمس ملکی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- دانشجوی دوره ی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه رازی

*h_sharafi@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۶/۲۹]

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۳/۲۱]

چکیده

در این مقاله رفتار دینامیکی شیب خاکی متشکل از مصالح ماسه‌ای خشک سست توسط مدل‌های کوچک-مقیاس فیزیکی و عددی مطالعه می‌شود. ردیفی از شمع‌های شناور مدل آلومینیومی درون شیب ماسه‌ای ساخته شده در جعبه صلب و شفاف مدلسازی فیزیکی، روی میز لرزه نصب شده‌اند. میز لرزه کوچک-مقیاس دو درجه آزادی با منشا ارتعاش الکترو-دینامیک به کمک سنسورهای اندازه‌گیری شتاب و تغییر مکان، ابزاربندی شده است. بارگذاری لرزه‌ای هارمونیک یک بار در راستای طولی شیب، یکبار در راستای عرضی شیب و بار دیگر به طور همزمان در هر دوی این راستاها اعمال شده است. مقادیر پاسخ‌های نشست تاج شیب که به کمک سنسور LVDT در هر یک از این حالات بارگذاری، اندازه‌گیری شده اند، به عنوان منحنی‌های خروجی ارائه شده‌اند. در پایان مقاله، برای درستی آزمایشی نتایج مدل فیزیکی کوچک-مقیاس، مدل عددی تفاضل محدود سه بعدی مانند آن ایجاد شده است. هماهنگی و توافق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بدست آمده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش راستای بارگذاری شیب از حالت مرسوم یک محوری به دو محوری و نیز عدم تسلیح شیب با ردیف شمع، باعث افزایشی چشمگیر و بیش از ۱۰۰٪ در مقادیر تغییر مکان های قائم خواهد شد.

واژگان کلیدی: شیب ماسه‌ای، ردیف شمع، مدل فیزیکی، مدل عددی، ابزاربندی، سنسورهای شتاب و تغییر مکان.

۱- مقدمه

شمع-شیب، به روش‌های مرسوم تحلیلی، دشوار و در پاره‌ای از موارد غیر ممکن است. در چنین مواردی راه حل جایگزین استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و مدلسازی‌های آزمایشگاهی است. تحلیل لرزه‌ای رفتار تغییرشکلی شیب‌های خاکی، به لحاظ ایجاد تغییر مکان‌های ماندگار، در گذشته به کمک روش متداول بلوک لغزان نیومارک [1-5] صورت گرفته است. همچنین قدمت و نتایج سودمند حاصل از روش‌های تعادل حدی [6-9] و تحلیل حدی

شمع‌ها به عنوان شالوده سازه‌های مهندسی گوناگون، می‌توانند شرایط هندسی، محیطی و بارگذاری‌های پیچیده‌ای را متحمل شوند. برای مثال وجود شیب در زمین از عوامل ایجادکننده پیچیدگی در رفتار اندرکنشی شمع و خاک است. عموماً، با قرار گرفتن شمع‌ها در درون یا مجاور شیب‌ها، از ظرفیت باربری آنها کاسته می‌شود. در حالت وجود بارگذاری لرزه‌ای، تحلیل مساله اندرکنش دینامیکی

لرزه‌ای، در برخی منابع مرجع [24] که مورد مطالعه قرار گرفته است. راستای بارگذاری دینامیکی مطابق شکل (۱-آ) می‌تواند به شکل حرکات لرزه‌ای درون-صفحه یا حرکات برون-صفحه باشد. برخلاف شرایط موجود در برخی مراجع [24] در اینجا دو مشکل عمده به مساله کلاسیک اثر راستای انتشار امواج لرزه ای افزوده می‌شود [24]، که عبارتند از: (۱) اثر تفاوت هندسی در مساله اولیه زمین افقی، به شکل وجود عارضه ی شیب و (۲) وجود المان‌های صلب ردیف شمع (بتنی یا فولادی) درون شیب.

وجود شیب باعث تغییر در وضعیت تنش‌های محصورکننده خاک و نیز کاهش ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها می‌شود. از طرفی، ردیف شمع‌ها با سختی زیاد، فرکانس لرزه‌ای طبیعی مجموعه شیب-ردیف شمع را افزایش می‌دهند [1,21]. حل مساله جدید اثر راستای بارگذاری لرزه‌ای، بر اندرکنش ردیف شمع‌ها و شیب، به کمک روابط تحلیلی متداول، طولانی خواهد بود. از طرفی، در حل تحلیلی، روابط محاسباتی بلند، با تعداد پارامترهای متغیر و ثابت زیادی حاصل می‌شوند. راه‌حل جایگزین مقاله حاضر برای حل این مساله، استفاده همزمان از شبیه سازی‌های در دسترس عددی و آزمایشگاهی با دقت بالا و مقیاس مناسب است.

شکل ۱. تعریف مساله شامل نمایش هندسه، ابزاربندی و ابعاد مدل‌های عددی و

فیزیکی متناظر: (آ) نمای سه بعدی؛ (ب) مقطع عرضی شمع‌ها.

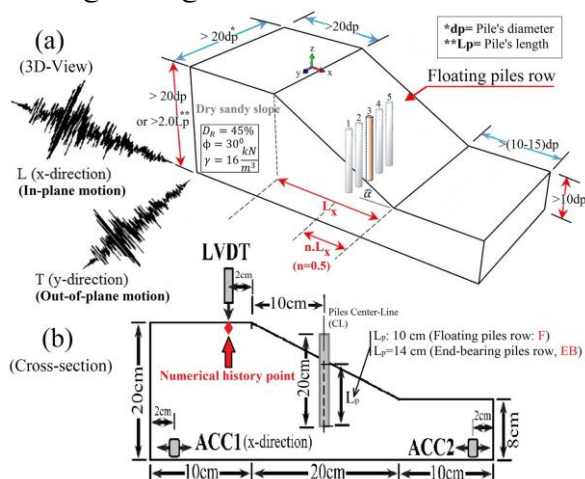


Fig. 1. Definition of problem including geometry, instrumentation and dimensions of corresponding numerical and physical models: (a) 3D view, (b) piles cross-section.

مدل هندسی مطالعه حاضر، شامل ابعاد نسبی مدل عددی سه بعدی (نسبت به قطر شمع‌ها) و فرضیات بارگذاری لرزه‌ای چند محوری،

[10-15] نیز، در تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب‌های خاکی مسلح شده با ردیف شمع و مسلح نشده قابل توجه است. روش تعادل حادی نقص‌های زیادی دارد، که از جمله مهم‌ترین آنها لحاظ نکردن رفتار تنش-کرنش واقعی توده خاک تشکیل دهنده شیب در تعیین دقیق محل و شکل سطح لغزش-گسیختگی است.

همچنین در روش تحلیل حادی، نظریه خمیری و شرایط جریان همراه در مدل مور-کولمب در کنار تئوری کران بالا، به عنوان معیار محاسباتی اصلی برای مساله شیب، بکار می‌روند. ضعف‌های عمده این روش نیز، لحاظ نکردن اثر مشخصات زمانی و فرکانسی بارگذاری لرزه‌ای بر پاسخ تغییرشکلی شیب و شمع‌هاست. روش اندرکنش خاک و سازه نیز برای مطالعه اندرکنش شیب-شمع [16] مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های مدلسازی عددی دو و سه بعدی نیز، در حل چنین مسائلی بکار گرفته می‌شوند [17-20]. مدلسازی‌های آزمایشگاهی، به شکل مدل‌های فیزیکی با کمک ابزارهایی مانند سانتریفیوژ ژئوتکنیکی (میدان شتاب $n.g$) [21] یا میز لرزان ژئوتکنیکی (میدان شتاب $1.g$) [22,23] با چشم‌پوشی از آثار مقیاس مدلسازی، می‌توانند نتایج بسیار واقعی و قابل اعتمادی بدست دهند. به هر حال، نوآوری عمده این مقاله، توجه به راستای بارگذاری لرزه‌ای، نسبت به راستای طولی سطح لغزش شیب و مدلسازی عددی-فیزیکی همزمان مدل تحت بررسی مقاله است. به طور عمده تا بحال، راستای بارگذاری لرزه‌ای [21-23]، موازی راستای سطح لغزش شیب و فقط در یک جهت بوده و اثر بارگذاری لرزه‌ای در جهت عمود بر سطح لغزش یا ترکیب بارگذاری‌های در جهات عمود و موازی سطح لغزش شیب، برای مساله‌ی ردیف شمع شناور، بررسی نشده است. هدف این مقاله بررسی این موارد در چارچوب مدلسازی‌های فیزیکی- عددی (سه بعدی) است.

۲- روش‌شناسی مساله این مطالعه

در این مطالعه مساله اندرکنش لرزه‌ای ردیف شمع شناور در میانه شیب خاکی متشکل از ماسه خشک و سست، توسط مدلسازی‌های عددی سه بعدی و مدلسازی‌های فیزیکی کوچک-مقیاس میز لرزه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رفتار دینامیکی لایه‌های خاک افقی مستقر بر بسترهای سنگی، تحت اثر حرکات درون و برون صفحه امواج

درصد، به شکل مدل شیب توسط ابزار قیف و لوله شکل (۴) درون جعبه صلب مدلسازی ریخته شده است.

جدول ۱. ضرایب مقیاس حاصل از قوانین تشابه ابعادی برای آزمایش های میز لرزه در میدان شتاب 1.g

Parameters (unit) (soil-slope-piles interaction)	Similitude law P/M* [25]	Simplified $\lambda_e=1.0$ $\lambda_p=1.0$	Present values
Length, l (m)	λ	λ	100.0
Strain, ε (-)	λ_ε	1.0	1.0
Density, ρ (kg/m ³)	λ_ρ	1.0	1.0
Time (dynamic), t (s)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.5}$	10.0
Void ratio, e (-)	1.0	1.0	1.0
Displacement, u(m)	$\lambda\lambda_\varepsilon$	λ	100.0
Velocity, V (m/s)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.5}$	10.0
Acceleration, a(m/s ²)	1.0	1.0	1.0
Total stress, σ (kPa)	$\lambda\lambda_\rho$	λ	100.0
Frequency, f (Hz)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{-0.5}$	$\lambda^{-0.5}$	0.1
Piles flexural stiffness, EI (kN.m ²)	$\lambda^4\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	λ^4	1e8

* P/M: Prototype/Model

Table 1. Scale factors obtained from similitude laws for shaking table tests in 1.g acceleration field.

مطابق ضریب مقیاس سختی خمشی شمع ها (EI) در جدول (۱)، شمع های مدل آلومینیومی این مطالعه معادل شمع های بتن مسلح دایروی توپر با مدول ارتجاعی $E_c=26.51\text{GPa}$ (معادل $f_c=25\text{MPa}$) به قطر حدود ۸۶ cm هستند. در ساخت مدل های فیزیکی، برای دستیابی به یک دانسیته یکنواخت و همگن، روش بارش ماسه یک روش نسبتاً ایده آل و پرکاربرد به شمار می رود. اگر کمینه ارتفاع بارش برای ذرات ماسه بقدری باشد، که به سرعت ترمینال V_t برسند، فولکوله شدن و تجمع ذرات در نقاط مختلف نمونه خاک حداقل شده و باعث یکنواختی نمونه می شود [27]. منحنی های سرعت ترمینال، V_t و سرعت برخورد ذرات ماسه، V_i ، که برحسب سرعت ترمینال بدست می آید، در شکل (۲) ترسیم شده اند، همچنین محدوده مناسب برای ارتفاع سقوط ذرات ماسه در این شکل توسط محدوده به رنگ آبی مشخص شده است. برای محاسبه سرعت ترمینال و برخورد، با ایده آل فرض کردن شکل ذرات ماسه به شکل کروی، با قطر معادل D_{50} که از آزمایش دانه بندی خاک بدست می آید و فرض نیروی مقاومت هوای درگ وابسته به معادله ی درجه دوم سرعت، سرعت های V_t و V_i از روابط (۱ و ۲) بدست می آیند [27]:

$$V_t = \sqrt{(2 \cdot m \cdot g) / (C \cdot \rho_{air} \cdot A)} \quad (1)$$

همگی در شکل (۱) ارائه شده اند. مطابق شکل (۱)، بارگذاری های لرزه ای واقعی در سه ترکیب، شامل دو جهت اصلی طولی، L ، (در راستای سطح لغزش شیب) و عرضی و عمود بر سطح لغزش، T یا به طور همزمان، LT ، می توانند تعریف شوند. این بارگذاری ها دارای ماهیت یک محوری (U.A.) و دو محوری (B.A.) هستند. در تحلیل های عددی سه بعدی، قرارداد جهت مثبت محورهای مختصات، دقیقاً مطابق شکل (۱) است که در آن ردیف شمع شناور یا اتکایی آلومینیومی (مدل) ۵ تایی بدون کلاهک (با سر آزاد) به فواصل مرکز به مرکز $3.5d_p$ (که d_p قطر شمع است) وسط شیب ۳۱ درجه ای (در فاصله افقی $0.5L_x$) نصب شده اند.

۳- ساخت مدل های فیزیکی و عددی سه بعدی در مقیاس مدل

به منظور درستی آزمایی روش و نتایج عددی حاصل شده در این مطالعه، در زمینه آثار جهات بارگذاری لرزه ای بر رفتار لرزه ای شیب ماسه ای خشک مسلح شده با ردیف شمع شناور، مدل فیزیکی کوچک-مقیاس یک صدم، از این مساله به کمک میز لرزه (یعنی میدان شتاب 1.g) تحت اثر بارگذاری هارمونیک سینوسی ایجاد شده است. متغیر اصلی مورد بررسی در مدلسازی ها، کاهش نشست های تاج شیب ماسه ای خشک بوده است. مطابق مقطع عرضی مدل ها در شکل (۱-ب)، طول شمع های شناور مدل ۱۰ سانتی متر و طول شمع های اتکایی مدل ۱۴ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

ضرایب مقیاس مراجع [25,26]، برای برخی از پارامترهای اصلی مورد بررسی برای مقیاس هندسی یک صدم بین مدل و پروتوتایپ، در جدول (۱) ارائه شده اند. از طرفی چون مقیاس شبیه سازی فیزیکی مساله مقیاس کوچکی بوده و ممکن است برخی روابط تشابه مندرج در جدول (۱) برای تعبیر نتایج حاصل شده، ایجاد ابهام کنند، بنابراین مدلسازی های عددی مساله، در "مقیاس مدل" مدنظر قرار گرفته و به مدلسازی عددی در مقیاس پروتوتایپ با استفاده از قوانین تشابه موجود [25,26] برای میدان شتاب 1.g پرداخته نشده است. از شمع های مدل آلومینیومی توخالی به همراه شیب ماسه ای متشکل از ماسه ریز گردآوری شده از معادن ماسه رودخانه ای شهر کرمانشاه، به عنوان مصالح ساخت مدل فیزیکی استفاده شده است. مصالح ماسه ای ریز در حالتی سست با دانسیته نسبی بین ۴۵ تا ۴۷

که در این روابط ρ_d دانسیته خشک مصالح ماسه ای (gr/cm^3)، σ_m تنش حجمی میانگین در نمونه مصالح ماسه ای (Pa) و P_a فشار استاندارد اتمسفر معادل 101kPa است. مشخصات مقاومتی و سختی ارائه شده در جدول (۳) برای شیب سازی عددی مانند مدل فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته اند. سختی های نرمال و برشی در محل فصل مشترک شمع های مدل آلومینیومی و خاک ماسه ای در مدل عددی متناظر مدل فیزیکی، معادل 2GPa/m اعمال شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه ی ریز کرمانشاه.

Properties	Value
USCS sand classification	SP
Maximum dry density ($\gamma_{d,max}$)	1.94 gr/cm^3
Minimum dry density ($\gamma_{d,min}$)	1.43 gr/cm^3
Maximum void ratio (e_{max})	0.82
Minimum void ratio (e_{min})	0.34
Specific gravity of solids (G_s)	2.60
Effective diameter (D_{10})	0.3 mm
Mean diameter (D_{50})	0.92 mm
Uniformity coefficient ^a (C_u)	3.83
Curvature coefficient ^b (C_c)	1.043

^a Coefficient of uniformity ($=D_{60}/D_{10}$).

^b Coefficient of gradation ($=D_{30}^2/(D_{60}*D_{10})$).

Table 2. Physical properties of Kermanshah fine sand.

جدول ۳. مشخصات مقاومتی-سختی ماسه و شمع های مدل آلومینیومی.

Soil and piles parameters	Values
Kermanshah loose dry fine sand	
Poisson ratio, ν (-)	0.3
Cohesion (TA, DS), C (kPa)	0.0
Friction angle (DS), ϕ (deg)	32.0
Friction angle (TA), ϕ (deg)	30.0
Dilation angle (TA), ψ (deg)	0.0
Unit weight, γ (kN/m^3)	16.0
Static elastic modulus (TA), E (MPa)	20.0
Static shear modulus, G (MPa)	7.70
Dynamic shear modulus, G_{dyn} (MPa)	10.34
Relative Density, D_R (%)	45-47
Aluminum hollow model piles	
Elastic modulus, E_p (GPa)	70
Shear modulus, G_p (GPa)	26
Poisson ratio, ν_p (-)	0.33
Unit weight, γ_p (kN/m^3)	27.0
Wall thickness, t (mm)	0.50
Pile length, L_p (mm)	200
Pile outer diameter, D_o (mm)	8.0
Piles plastic moment, M_p (N.m)	7.61
Piles plastic modulus, Z (m^3)	28.2e-9
Piles yielding stress, σ_y (MPa)	270

Table 3. Sand and aluminum model piles strength-stiffness properties.

منحنی دانه بندی خاک ماسه ای ریز مورد استفاده در شکل (۳) ترسیم شده است. مطابق این شکل بخش اعظم این خاک متشکل از مصالح

$$V_i = V_t \cdot \sqrt{1 - \exp(-2gH / V_t^2)} \quad (2)$$

که در این روابط m و A به ترتیب جرم و سطح بیرونی ذرات ایده آل شده ی کروی شکل ماسه، g شتاب ثقل، ρ_{air} دانسیته هوا (برای هوای خشک معادل 11.8 N/m^3)، C ضریب درگ معادل ۰/۵ برای ذرات کروی، V_t سرعت ثابت ترمینال برای ذرات کروی به قطر ایده آل شده متوسط D_{50} که برای ماسه ریز مورد مطالعه، این مقدار مطابق جدول (۲) برابر 0.92 mm است، H ارتفاع سقوط ذرات ماسه و در نهایت V_i سرعت برخورد ذرات ماسه ای با سطح مدل فیزیکی است.

شکل ۲. منحنی سرعت سقوط-آزاد ذرات ماسه ریز کرمانشاه بر حسب ارتفاع سقوط ذرات.

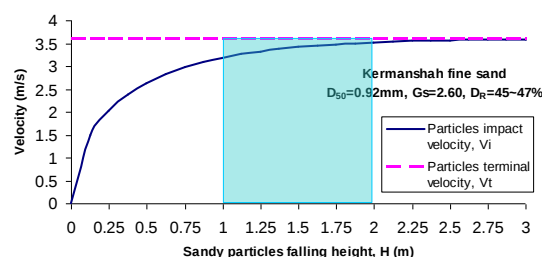


Fig. 2. Kermanshah fine sand particle free-fall velocity curve according to the particle fall height.

مطابق نمودار شکل (۲) ارتفاع سقوط-آزاد ذرات ماسه برای رسیدن به دانسیته ی موردنظر (45~47%) باید حداقل از یک متر بیشتر (یعنی جایی که نمودار دو سرعت تقریباً به یکدیگر میل می کنند) باشد. ویژگیهای فیزیکی ماسه ریز کرمانشاه در جدول (۲) ارائه شده است. این مشخصات از آزمایش های دانه بندی و چگالی سنجی بدست آمده اند. مشخصه های سختی و مقاومت خاک ماسه ای استفاده شده، مستخرج از اجماع نتایج آزمایش های مقاومت برشی از نوع برش مستقیم کرنش مسطح (DS) و سه محوری (TA) تحکیم یافته-زهکشی شده CD است. مشخصات هندسی و ارتجاعی، خمیری شمع های مدل آلومینیومی در جدول (۳) داده شده است. همچنین، مقدار سختی دینامیکی بیشینه مصالح ماسه ای، در جدول (۳)، از رابطه مرجع زیر بدست آمده است [29]:

$$G_{dmax} = K_p P_a (\sigma_m / P_a)^n \quad (3)$$

$$K_p = 295.62 \rho_d^2 + 197.09 \rho_d - 386.6 \quad (4)$$

$$n = -0.6094 \rho_d^2 + 1.8892 \rho_d - 0.9698 \quad (5)$$

شکل ۵. مدل فیزیکی: (آ) شیب مسلح شده؛ (ب) شیب مسلح نشده؛ مدل‌ها و شرایط مرزی عددی: (ث) استاتیکی؛ (د) دینامیکی.

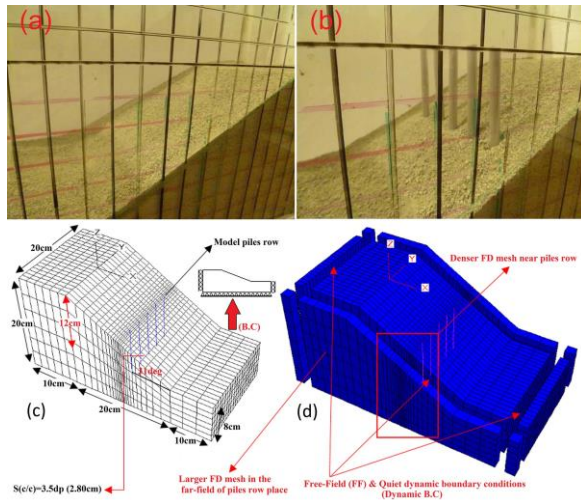


Fig. 5. (a) Physical model of : (a) reinforced slope; (b) unreinforced slope; models and numerical boundary conditions: (c) static, (d) dynamic.

همچنین برای مقایسه بهتر نتایج، از دو حالت تسلیح با ردیف شمع مدل، شامل: (۱) ردیف شمع شناور و (۲) ردیف شمع اتکایی (که در آن شمع‌ها تا انتهای بخش شیب‌دار ماسه‌ای نفوذ کرده‌اند) در میانه شیب استفاده شده است. ابعاد مدل‌سازی فیزیکی و نیز به طور مشابه ابعاد و چگونگی مش‌بندی مدل عددی سه بعدی مساله در دست بررسی در شکل (۵-ث) نشان داده شده است. شکل (۵-ث) شامل نمایش ابعاد هندسی و نیز شرایط مرزی (B.C) در مرحله ی پیش تحلیل استاتیکی و شکل (۵-د) معرف شرایط مرزی دینامیکی مدل عددی مانند مدل فیزیکی در مرحله ی دوم و فاز بارگذاری دینامیکی است. از شرایط مرزی میدان-آزاد و نیز مرزهای آرام در جوانب مدل عددی دینامیکی استفاده شده است. هدف اصلی در استفاده از این مرزها، میرا کردن و جلوگیری از بازگشت امواج لرزه‌ای تولیدشده به داخل مدل عددی و یا انعکاس و انکسار ناخواسته امواج در محل مرزهای جانبی مدل عددی سه بعدی است. نمونه ای از نیروی میراگر (با علامت مخالف منفی) در مرز میدان-آزاد (المان‌های حدفاصل)، در راستای محور-x به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff}) A + F_x^{ff} \quad (6)$$

که در این رابطه، ρ دانسیته مصالح ماسه‌ای در طول مرز جانبی C_p (kg/m³) سرعت مرزی موج لرزه‌ای فشاری v_x^m (m/s)، v_x^{ff} سرعت گره‌ای در راستای x در شبکه مش‌بندی اصلی مدل عددی برحسب v_x^{ff} (m/s) سرعت مرزی گره‌ای در میدان-آزاد مطابق

ماسه ای ریز است. در شکل (۴) ابزار قیف و لوله بکار برده شده که از ابزار مقاله مرجع [28] الگوبرداری شده، نشان داده شده است. طول لوله متصل به بخش قیفی شکل، برای ایجاد حرکت سقوط-آزاد موردنظر، برای تشکیل دانسیته نسبی یکنواخت حدود ۴۵ تا ۴۷ درصد، بر اساس محاسبات صورت گرفته و محدوده آبی رنگ مشخص شده در نمودار شکل (۲) بدست آمده است. بر اساس محاسبات، این طول باید حداقل بزرگ‌تر از یک متر تا حداکثر ۲ متر باشد.

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه ریز SP برای مدل‌سازی‌های عددی سه بعدی تفاضل محدود صریح.

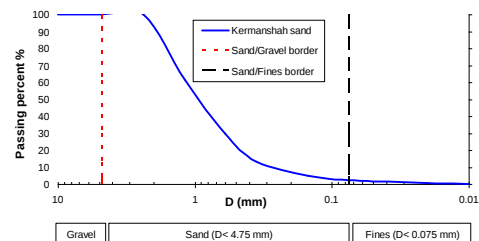


Fig. 3. Grading curve of SP fine sand for explicit finite difference 3D numerical modeling.

در شکل (۵) مدل کوچک-مقیاس شیب ماسه‌ای سست با زاویه شیب ۳۱ درجه درون جعبه ی مدل‌سازی صلب نشان داده شده است. شیب ماسه‌ای خشک در حالات بدون تسلیح در شکل (۵-آ) و با تسلیح در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها برابر ۳/۵ برابر قطر شمع‌ها (معادل ۲۸ میلی‌متر طبق شکل ۵) است.

شکل ۴. ابزار بکار رفته برای ایجاد شیب با دانسیته نسبی ۴۵٪ مشابه مطالعات مرجع [28] (ابعاد به میلی‌متر).

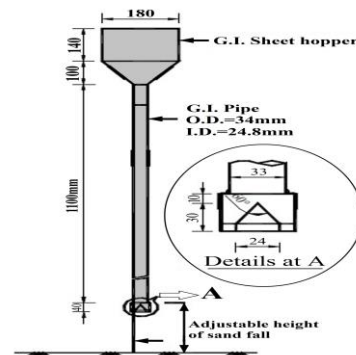


Fig. 4. Used tool for creating slope by 45% relative density similar to the studies of reference [28] (units: mm).

نصب شمع های مدل آلومینیومی پس از ساخت شیب ماسه ای صورت گرفته است [21]. برای نصب شمع ها از یک ابزار الگو، مانند موارد ارائه شده در شکل (۷) استفاده شده است. خوبی استفاده از این الگوها، آنست که فواصل دقیق مرکز به مرکز شمع ها رعایت شده و با حفظ ضخامت مناسب برای الگو، نصب شمع ها دقیقاً در راستای تراز قائم امکان پذیر می شود این الگو، دست خوردگی بخش شیب دار و میزان تماس ها، برای نصب شمع ها را نیز به شدت کاهش می دهد.

شکل ۷. مقایسه روش نصب شمع ها در بدنه شیب ماسه ای خشک: (ا) در مطالعه حاضر، (ب) در مطالعه مرجع [33]

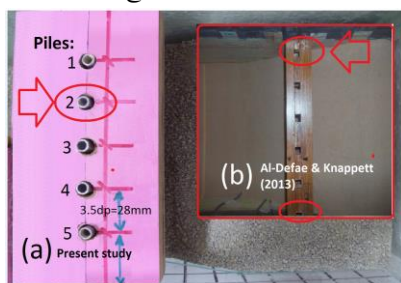


Fig. 7. Comparison of piles installation method inside dry sandy slope body: (a) present study, (b) study of reference [33].

۳-۱- جزئیات ابزاربندی مدل فیزیکی کوچک-مقیاس

در این بخش جزئیات ابزاربندی مدل فیزیکی کوچک-مقیاس شیب ماسه ای مستقر بر میز لرزه دو درجه آزادی ارائه شده است. با توجه به اینکه میز لرزه، تحریک هارمونیک سینوسی تا حداکثر دو درجه آزادی انتقالی افقی ایجاد می کند، سه ترکیب بار لرزه ای افقی طولی L ، افقی عرضی T و اثر همزمان این دو مولفه LT با دامنه جابه جایی یکسان به بستر مدل فیزیکی اعمال شده است. محرک ایجاد حرکات لرزه ای در هر درجه آزادی میز لرزه، موتورهای الکتریکی جریان مستقیم هستند.

برای اندازه گیری شتاب میز در نقاط مختلف درون جعبه شفاف مدلسازی از سنسورهای شتاب پیزوالکتریک حساسیت بالای 1000mv/g یک محوری، با دقت بالا و ساینز کوچک (یعنی 20×50 میلی متر) متناسب با ابعاد داخلی جعبه و ساینز مدل فیزیکی شیب، مطابق شکل (۸-ا) استفاده شده است. خروجی آنالوگ سنسورهای شتاب از نوع ولتاژ (یعنی milli V) است، که پس از انجام

شکل (۶) (m/s) ، A سطح تاثیر گره میدان آزاد (m^2) ، F_x^{ff} نیروی لرزه ای افقی در محل مرز میدان آزاد (N) و F_x برآیند نیروی نامتعادل افقی مرزی در کل مدل عددی شامل شرایط مرزی المان حدفاصل است. همچنین از تمهید مرز-آرام (یا ساکن) معرفی شده توسط مرجع [30] شامل میراگرهای اتصال یافته مستقل به مرز مدل عددی نیز، در جهات نرمال و برشی مرز مدل عددی استفاده شده است. میراگرها عکس العمل های نرمال و برشی سطحی ویسکوزی، مطابق روابط زیر برای میرا کردن (با علامت منفی هستند) امواج لرزه ای در مرز مدل عددی سه بعدی فراهم می آورند:

$$t_n = -\rho C_p v_n \quad (7)$$

$$t_s = -\rho C_s v_s \quad (8)$$

که در این روابط ρ دانسیته مصالح، C_p و C_s سرعت امواج لرزه ای فشاری و برشی تولید شده و v_n و v_s مولفه های عکس العمل نرمال و برشی سرعت امواج در مرز مدل عددی هستند. برای مصالح خاکی، میرایی عموماً بین ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی است، این مقدار برای سیستم های سازه ای ۲ تا ۱۰ درصد است [31]. در اینجا، از میرایی محلی با نسبت میرایی بحرانی متداول ۵٪ برای بیان رفتار مستهلک کنندگی امواج لرزه ای توسط مصالح ماسه ای ریز و نیز شمع های مدل آلومینیومی، مطابق رابطه زیر استفاده شده است:

$$\alpha_L = \pi \cdot D = \pi \cdot (0.05) = 0.157 \quad (9)$$

که در این رابطه α_L میرایی محلی، D نسبت میرایی بحرانی و π مقدار ثابت $3/14$ است. مطابق مراجع معتبر [3,19,20]، برای مدلسازی خاک از مدل مور-کولمب و برای مدلسازی شمع ها از مدل ارتجاعی-خطی با تعریف ظرفیت خمشی خمیری مقاطع شمع های مدل آلومینیومی، استفاده شده است.

شکل ۶. مفاهیم بارگذاری ورودی و مرزهای دینامیکی مساله: (ا) مدل عددی و مرزهای دینامیکی؛ (ب) میراگرهای امواج در مرز میدان-آزاد.

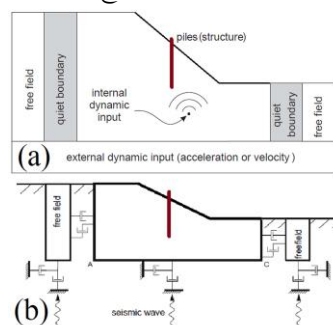


Fig. 6. Concepts of input motion and dynamic boundaries of the problem: (a) numerical model and dynamic boundaries; (b) waves dampers in free-field boundary.

روی داده‌های خام شتاب حاصل از سنسورهای شتاب، از جمله اصلاح خط پایه انجام شده است. همچنین فیلتر فرکانسی با پیکربندی High-pass از نوع Butterworth در محدوده فرکانسی بزرگ‌تر از 0.1Hz با توجه به حداقل فرکانس قابل اندازه‌گیری توسط سنسورهای شتاب، به داده‌های شتاب اعمال شده است. مطابق شکل (۹-آ) بیشینه شتاب هارمونیک اعمال شده در راستای محور-x معادل 0.295g و در شکل (۹-ب) در راستای محور-y معادل 0.939g است. از طرفی، دامنه هر دو جابه‌جایی هارمونیک متناظر این شتاب‌ها، معادل ۱۰ cm است. فرکانس کلی حرکت هارمونیک راستای محور-x معادل ۸/۱۶Hz و محور-y معادل ۱/۱۶Hz است. در واقعیت، با مراجعه به ضریب مقیاس فرکانس ۱/۱۶Hz در جدول (۱) در قبل، مشاهده می‌شود، که این فرکانس‌ها معادل فرکانس طبیعی شیب‌های مرتفع با پریود بلند مطابق نکات مطرح شده در مرجع [21] هستند. همچنین، بر اساس طیف های فوریه رسم شده در شکل (۹-ث)، فرکانس های غالب شتاب ورودی ثبت شده راستای x-، 1.855Hz و راستای y-، 2.930Hz است.

شکل ۹. نمایش توزیع زمانی و فرکانسی بارگذاری میز لرزه: (آ) شتاب طولی،

(ب) شتاب عرضی، (ث) طیف های فوریه.

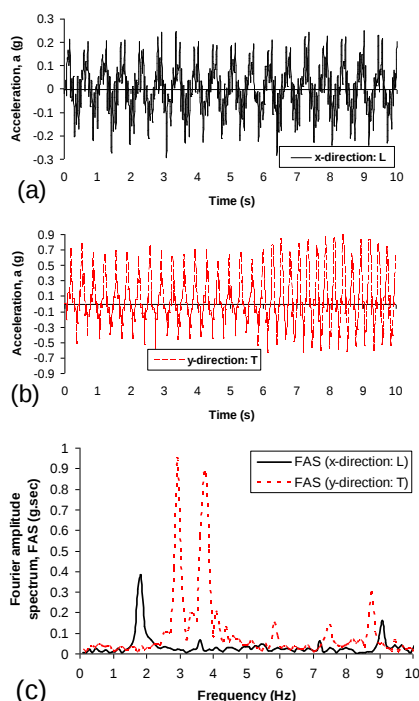


Fig. 9. Presentation of time and frequency distributions of shaking table loading: (a) longitudinal acceleration, (b) transverse acceleration, (c) Fourier spectrums.

تصحیحات مربوطه، می‌توان آنها را به نمودار ضرایب شتاب ثقل g تبدیل کرد.

سیستم دیتالاگر سرعت بالای برداشت داده‌های شتاب، دارای رزولوشن تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال 14bit است و در سر راه هر سنسور شتاب تا دیتالاگر، یک سیگنال کاندیشنر برای پالایش داده‌های شتاب ارسالی از سنسورها قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری نشست در تاج شیب ماسه‌ای مدل در بالادست، از سنسور اندازه‌گیری تغییرمکان خطی، مطابق شکل (۸-ب) استفاده شده است. خروجی سنسور اندازه‌گیری تغییرمکان نیز مانند سنسور شتاب از نوع آنالوگ و از جنس یکای الکتریکی ولتاژ (mm/V) است. این سنسور قادر است تا تغییرمکان‌های در محدوده را تا 100mm را اندازه‌گیری نماید. همچنین اتصال کانکتور LVDT مطابق شکل (۸-ث) به سیستم دیتالاگر ۸ کاناله در شکل (۸-د) نشان داده شده‌اند.

شکل ۸. (آ) اتصال سنسور شتاب سنج؛ (ب) سنسور اندازه‌گیری تغییرمکان

خطی، (ث و د) اتصال سنسور تغییرمکان به دیتالاگر.

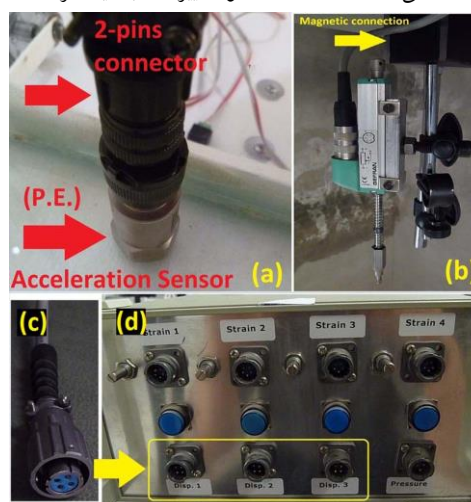


Fig. 8. (a) Acceleration sensor connection; (b) linear displacement sensor, (c,d) data logger-displacement sensor connector.

خروجی شتاب اعمال شده به هر یک از راستاهای میز لرزه به همراه توزیع فرکانسی این حرکات، که به طور همزمان توسط سنسورهای شتاب اندازه‌گیری شده‌اند، در نمودار شکل (۹) ترسیم شده است. در ترسیم نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب‌های میز لرزه، فقط شوک اصلی ثبت شده توسط سنسورهای شتاب، رسم شده است. برای دستیابی به نمودار شتاب شکل (۹)، اصلاحاتی

نتایج نشست تاج شیب در شکل (۱۱-آ) برای بارگذاری در راستای طولی شیب L در شکل (۱۱-ب) برای بارگذاری همزمان در راستاهای طولی و عرضی LT و در شکل (۱۱-ث) برای بارگذاری تنها در راستای عرضی T ارائه شده است. همچنین در این بخش نتایج مدلسازی عددی و فیزیکی ردیف شمع اتکایی نیز برای مقایسه میزان تاثیرگذاری آنها بر کاهش نشست شیب در مقایسه با ردیف شمع های شناور موضوع مقاله، ارائه شده است. آنچه که در تمامی نتایج شکل (۱۱) مشهود است، اختلاف چشمگیر نشست تاج شیب در حالت مسلح نشده در مقایسه با شیب مسلح شده است، که با توجه به مقادیر کمی نمودارها، این اختلاف عموماً بیش از ۵۰٪ است. همچنین علت اصلی اختلاف مقادیر پاسخ های شکل (۱۱-ب) نسبت به شکل (۱۱-آ) افزایش راستای بارگذاری از یک راستا (L) به دو راستای برآیند (LT) در مدل عددی و فیزیکی مربوط به شکل (۱۱-ب) است. همچنین دلیل اصلی اختلاف چشمگیر مقادیر کمی پاسخ های نشست شکل های (۱۱-آ) و (۱۱-ث) به دلیل افزایش سه برابری دامنه شتاب بارگذاری در مدل عددی مرتبط با شکل (۱۱-ث) است. از طرفی در هر سه نمودار شکل (۱۱) مقادیر نشست حاصل از اندازه گیری ها از مقادیر حاصل از مدلسازی های عددی، کمتر بدست آمده است. دو علت عمده نیز، برای وجود این اختلاف بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی فیزیکی می توان ذکر کرد.

اول آنکه امکان مدلسازی کامل شرایط مرزی استاتیکی و دینامیکی واقعی مدل فیزیکی در حین مدلسازی های عددی وجود ندارد. برای نمونه آثار نشست کناره های مدل در اثر اتکا خاک ماسه ای به دیواره لغزنده و صلب جعبه مدلسازی در شبیه سازی عددی به طور کامل قابل مدلسازی نیست. دوم آنکه در مدل عددی از شرایط مرزی دینامیکی میدان آزاد و مرز آرام استفاده شده، که صرفاً جلوی بازگشت امواج به داخل مدل عددی و انعکاس و انکسار ناخواسته امواج لرزه ای تولید شده و بروز خطا در مدل را می گیرد، حال آنکه در مدل فیزیکی دیواره های سخت در جعبه مدلسازی، بخشی از انرژی امواج لرزه ای تولید شده توسط میز لرزه در هر راستا را به خود جذب می کند. به علت اختلاف سختی زیاد بین خاک ماسه ای و دیواره صلب جعبه، بخش از انرژی لرزه ای جذب مصالح جعبه با جعبه با سختی بیشتر شده و سهم کمتری به خاک ماسه ای خشک سست درون آن می رسد، از این رو طبیعتاً نشست های تاج شیب در

۲-۳- نتایج حاصل از مقایسه تحلیل مدل های عددی و اندازه گیری مدل های فیزیکی

در این بخش نتایج مدلسازی های عددی و فیزیکی ارائه می شود. مطابق شکل (۱۰)، شکل شیب بعد از بارگذاری های طولی در مدل ردیف شمع شناور (F) و بارگذاری عرضی در مدل ردیف شمع اتکایی (EB) ارائه شده است. خطوط سبز رنگ، شکل اولیه شیب و خطوط قرمز رنگ نشانگر وضعیت شیب، پس از بارگذاری لرزه ای در جهات مختلف است. در این شکل ابعاد چشمه های شبکه مربعی ۲ cm است.

شکل ۱۰. نمونه ی تغییر شکل شیب ها پس از بارگذاری: (آ) شمع شناور و بار طولی، (ب) شمع اتکایی و بار عرضی.

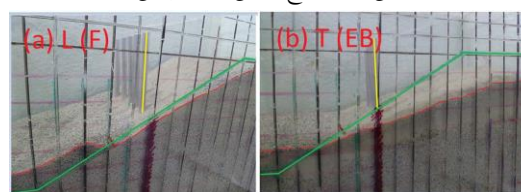


Fig. 10. Examples of slopes deformation after loading: (a) floating piles and L load, (b) end-bearing piles and T load.

همچنین، در شکل (۱۱) مقایسه ی یافته های حاصل از مدلسازی عددی و نیز مدلسازی فیزیکی کوچک-مقیاس میز لرزه، در خصوص پارامتر نشست تاج شیب ماسه ای سست در مقیاس مدل ارائه شده است.

شکل ۱۱. نشست تاج شیب در مدل های فیزیکی میز لرزه ای برای بارگذاری: (آ) طولی L، (ب) طولی و عرضی همزمان LT، (ث) عرضی T.

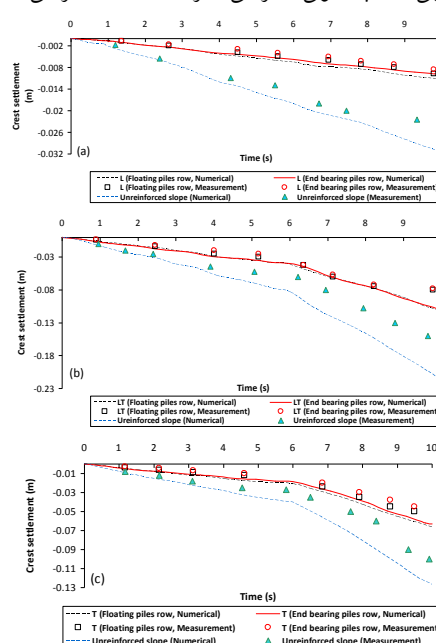


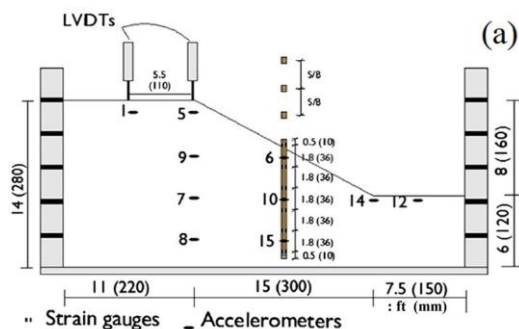
Fig. 11. Slope crest settlement in shaking table physical models for loading states: (a) L, (b) LT, (c) T.

۴- درستی آزمایی نتایج روش عددی توسط یافته‌های آزمایش سائتریفیوژ ژئوتکنیکی

در این بخش درستی آزمایی نتایج و روش عددی استفاده شده با مدل‌سازی نشست تاج شیب مدل مطابق شکل (۱۲-آ) در نزدیک ترین مدل (موجود) به مدل مقاله حاضر انجام می‌شود. برای این منظور نتایج مدل‌سازی سائتریفیوژ در میدان شتاب 50g توسط مرجع [21] انتخاب شده است. نمودار نشست تاج شیب مطابق شکل (۱۲-ث) تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای میدان نزدیک چی-چی با بیشینه شتاب $0.41g$ در ایستگاه TCU-072 مطابق شکل (۱۲-ب)، به شکل الگوی پس لرزه‌های قوی، مدل‌سازی شده است. مطابق شکل (۱۲-آ) ردیف شمع مدل آلومینیومی ارتجاعی با مقطع مستطیلی به ابعاد $5/2$ در 10 میلی متر، طول 200 میلی متر و فواصل مرکز به مرکز $3/5$ برابر عرض شمع، بکار گرفته شده است. بنابر شکل (۱۲-ث) توافق مناسبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و مدل فیزیکی سائتریفیوژ مشاهده می‌شود. یادآوری می‌شود که مدل‌سازی‌های عددی در مقیاس مدل انجام شده و نتایج توسط ضرایب مقیاس ستریفیوژ معرفی شده در مراجع [32,33] در مقیاس پروتوتایپ ارائه شده‌اند. ردیف شمع مدل ارتجاعی آلومینیومی مطابق شکل (۱۲-آ) در شیب متشکل از مصالح ماسه‌ای خیلی ریز HST-95 خشک، با دانسیته‌های نسبی 56% درصد (شیب مسلح نشده AA01) و 59% درصد (شیب مسلح AA15) جایگذاری شده‌اند. جزئیات دقیق پارامترهای مصالح و بارگذاری لرزه‌ای در مراجع مرتبط [1,21,32,33] بطور کامل آورده شده است. نتایج تحلیل تفاضل محدود سه بعدی، با برچسب 3D-FDA در نمودارهای شکل (۱۲-ث) داده شده است.

مدل فیزیکی، کمتر از نشست‌های مدل عددی مانند آن خواهد شد. در قسمت‌های (آ) تا (ث) در شکل (۱۱) مقادیر نشست تاج شیب مسلح شده با ردیف شمع شناور (یعنی منحنی‌های سیاه رنگ) اندکی بیشتر از شیب با ردیف شمع اتکایی (یعنی منحنی‌های قرمز رنگ) است. علت این اختلاف کم نیز، عدم وجود لایه ی کاملاً متراکم تحتانی، در مدل‌های عددی و فیزیکی شیب ماسه‌ای است. در واقع در مدل ردیف شمع اتکایی، فقط طول شمع‌ها برای اتکا به کف مدل‌های عددی و فیزیکی بیشتر شده و شمع‌ها درون لایه متراکم‌تری (مانند مطالعات کلاسیک [19]) نسبت به لایه‌های سطحی تر شیب، فرو نرفته و گیردار نشده‌اند. به علاوه، در شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-ث) یک شکست در نمودارهای نشست مشاهده می‌شود، که چنین شکستی در نمودارهای شکل (۱۱-آ) قابل مشاهده نیست. علت این شکست در نمودارها، وجود دو قله در طیف فرکانس حرکت ورودی اعمال شده در راستای محور y -مطابق شکل (۹-ث) است، که چنین حالتی در طیف فوریه حرکت ورودی راستای x -وجود ندارد. همچنین در نمودار شکل (۱۱-ب) یک ابهام در مقادیر نشست تاج شیب محاسبه شده به روش مدل‌سازی عددی وجود دارد و آنهم وجود نشست بزرگ‌تر از 200mm است، که از ارتفاع کل مدل فیزیکی و یا عددی شیب نیز بیش‌تر شده است. علت این مساله آن است که نشست در تاج شیب مدل عددی اندازه‌گیری شده و نقطه‌ی تاریخچه زمانی در تاج شیب تعریف شده است. از طرفی بیشترین ناپایداری در مدل عددی شیب، همواره از نزدیک تاج شیب شروع شده و در بقیه جسم شیب تا پایین دست شیب منتشر می‌شود. در ادامه انتشار تغییرشکل‌ها از تاج به سمت پایین دست، ممکن است نقاطی موضعی در تاج شیب، تغییر مکان‌های تجمعی نسبتاً بزرگی را تجربه کنند، که در این مورد نیز نقطه ثبت تاریخچه زمانی پاسخ نشست تاج شیب در مدل عددی، در چنین موضعی واقع شده است و تغییر مکان‌های تجمعی زیادی را ثبت کرده، که مقادیری از آن، که از ارتفاع کل شیب نیز تجاوز کرده، مقادیر غیر واقعی، تجمعی و محلی ناشی از ضعف مدل‌سازی‌های عددی و ناپایداری موضعی سطحی در سطح مدل عددی شیب هستند.

شکل ۱۲. صحت‌سنجی نشست تاج شیب مدل سائتریفیوژ [21]: (آ) مدل فیزیکی، (ب) بارگذاری شتاب؛ (ث) نشست‌های آزمایشگاهی و عددی.



بارگذاری های لرزه ای چندمحوری، می تواند باعث کاهش قابل توجه تغییر شکل های شیب های ماسه ای خشک سست شود و از این طریق پایداری لرزه ای شیب در برابر گسیختگی های موضعی و کلی افزایش یابد. در واقع مطابق نتایج این پژوهش، کاهش نشست تاج شیب، با نصب ردیف شمع بیش از ۵۰٪ بوده است.

-۴

References

۶- مراجع

- [1] Al-Defae A.H., Knappett J.A. 2015 Newmark sliding block model for pile-reinforced slopes under earthquake loading. *Soil Dyn and Earthquake Eng.*, 75, 265-278.
- [2] Song J., and Rodriguez-Marek A. 2015 Sliding Displacement of Flexible Earth Slopes Subject to Near-Fault Ground Motions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. (ASCE)*, 141(3), 1-16.
- [3] Erfani Joorabchi A., Liang R.Y., Li L., Liu H. 2014 Yield acceleration and permanent displacement of a slope reinforced with a row of drilled shafts. *Soil Dyn and Earthquake Eng.*, 57, 68-77.
- [4] Baziari M.H., Rezaei pour H., and Jafarian Y. 2012 Decoupled Solution for Seismic Permanent Displacement of Earth Slopes Using Deformation-Dependent Yield Acceleration. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(7), 917-936.
- [5] Newmark NM. 1965 Effect of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139-59.
- [6] Duncan J.M. 1996 State of the Art: limit equilibrium and finite element analysis of slope. *J Geotech Eng*, 122(7), 577-95.
- [7] Mendes R.M., Andrade M.R.M., Graminha C.A., Prieto C.C., Avila F.F., Camarinha P.I.M. 2018 Stability Analysis on Urban Slopes: Case Study of an Anthropogenic-Induced Landslide in Sao Jose dos Campos, Brazil. *Geotech Geol Eng*, 36(1): 599-610.
- [8] Yamin M.M., Attom M.F., Liang R.Y. 2017 Solutions for soil-pile-soil forces in pile stabilized slopes. *Geotech Geol Eng*, 35(4), 1859-1869.
- [9] Nian T.K., Jiang J.C., Wang F.W., Yang Q., Luan M.T. 2016 Seismic stability analysis of slope reinforced with a row of piles. *Soil Dyn and Earthquake Eng.*, 84, 83-93.
- [10] Nadukuru S.S., Michalowski R.L. 2013 Three-dimensional displacement analysis of slopes subjected to seismic loads. *Can Geotech J*, 50(6), 650-61.
- [11] Gao Y.F., Zhang F., Lei G.H., Li D.Y. 2012 An extended limit analysis of three-dimensional slope stability. *Geotechnique*, 63(6), 518-24.
- [12] Li X., He S., Wu Y. 2010 Seismic displacement of slopes reinforced with piles. *J Geotech Geoenviron Eng*, 136, 880-4.
- [13] Loukidis D., Bandina P., Salgado R. 2003 Stability of seismically loaded slopes using limit analysis. *Geotechnique*, 53(5), 463-79.
- [14] Ausilio E., Conte E., and Dente G. 2000 Seismic stability analysis of reinforced slopes. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 19:159-172.

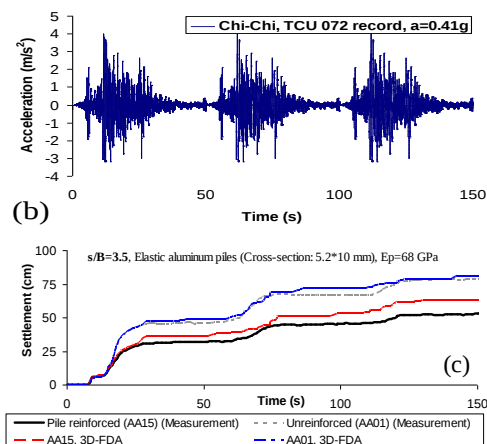


Fig. 12. Verification of the centrifuge model slope crest settlement [21]: (a) physical mode, (b) acceleration loading, (c) experimental and numerical settlements.

۵- نتیجه گیری ها و بحث

در این مقاله رفتار لرزه ای شیب های مسلح شده با ردیف شمع شناور توسط مدل های فیزیکی کوچک-مقیاس میز لرزه و عددی تفاضل محدود صریح سه بعدی، در مقیاس مدل مورد مطالعه قرار گرفته است. بارگذاری مدل فیزیکی توسط میز لرزه الکترو-دینامیک دو درجه آزادی، با منشا ارتعاش هارمونیک سینوسی اجرا شده است. در مطالعات این مقاله، اثر راستای بارگذاری لرزه ای بر میزان تغییر شکل های شیب ماسه ای خشک سست پژوهش شده است. یافته های کلی حاصل از مدلسازی های عددی و فیزیکی این مقاله، به شرح موارد زیر هستند:

۱- بارگذاری های لرزه ای همزمان در راستای دو محور، بر خلاف بارگذاری های معمول شیب، که در راستای یک محور و در جهت طولی و سطح لغزش شیب اعمال می شوند، آثار زیادی بر مقادیر تغییر شکل های شیب و نیروهای داخلی در شمع های مسلح کننده شیب دارند.

۲- در این مقاله، مطالعه و حل مساله کلاسیک آثار انتشار درون-صفحه و برون-صفحه امواج لرزه ای در ترکیب با پیچیدگی های وجود شیب در زمین و ردیف شمع، توسط راه حل پیشنهادی جدید، یعنی استفاده همزمان از شبیه سازی های عددی و مدلسازی های فیزیکی میز لرزه، برای درک جزئیات دقیق و ابهامات این مساله در یک چارچوب کامل علمی و عملی-تجربی ارائه شده است.

۳- نتایج این مطالعه نشان می دهند که نصب یک ردیف از شمع های شناور نیز مانند ردیف شمع های اتکایی [19]، با وجود اثر

- [24] Wolf J.P. 1985 Dynamic soil-structure interaction. New Jersey: *Prentice-Hall*.
- [25] Iai S. 1989 Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *J Soil Found*, 1989, 29(1),105-118.
- [26] Wood D.M. 2004 Geotechnical modeling. *E & FN Spon*.
- [27] Ueno K. 1998 Methods for preparation of sand samples. In *proceedings of 1998 int. conf. of centrifuge*, 98(2), 1047-1056.
- [28] Muthukkumaran K. 2014 Effect of slope and loading direction on laterally loaded piles in cohesionless soil. *Int. J. of Geomech*, 14(1),1-24.
- [29] Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., Tokimatsu, T. 1986 Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112, 1016-1032.
- [30] Lysmer J., and Kuhlemeyer R.L. 1969 Finite Dynamic Model for Infinite Media. *J. Eng. Mech.*, 95(EM4), 859-877.
- [31] Biggs. J. M. 1964 Introduction to Structural Dynamics. New York: *McGraw-Hill*, USA.
- [32] Al-Defae A.H., Caucis K., Knappett J.A. 2013 After shocks and the whole-life seismic performance of granular slopes. *Géotechnique*, 63(14),1230-44.
- [33] Al-Defae, A.H.H. 2013 Seismic performance of pile-reinforced slopes. PhD thesis, *University of Dundee*, UK.
- [15] Chang C.J., Chen W.F., Yao J.T.P. 1984 Seismic displacements in slopes by limit analysis. *J Geotech Geoenviron Eng*, 110(7), 860-74.
- [16] Ashour M., Ardalan H. 2012 Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction. *J Comput Geotech*, 39, 85-97.
- [17] Griffiths D.V., & Lane P.A. 1999 Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- [18] Huang S., Lv Y., Peng Y. 2016 Dynamic Response of Sandy Slope Under Coupling of Earthquake and Groundwater. *Geotech Geol Eng*, 34(3): 889-899.
- [19] Kourkoulis R., Gelagoti F., Anastasopoulos I., Gazetas G. 2012 Hybrid method for analysis and design of slope stabilizing piles. *J Geotech Geoenviron Eng*, 138(1),1-14.
- [20] Sharafi H., Shams Maleki Y., and Karimpour Fard M. 2016 Three-dimensional finite difference modeling of static soil-pile interactions to calculate p-y curves in pile-supported slopes. *Arab J Geosci*, 9(5), 1-16.
- [21] Al-Defae A.H., Knappett J.A. 2014 Centrifuge modelling of the seismic performance of pile-reinforced slopes. *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, 140(6),1-13.
- [22] Giri D., and Sengupta A. 2010 Dynamic behavior of small-scale model slopes in shaking table tests. *Int. J. of Geotech. Eng.*, 4(1), 1-11.
- [23] Liang T., Shengyi C., Xianzhang L., and Nengpan J. 2017 The boundary conditions for simulations of a shake-table experiment on the seismic response of 3D slope, *Earthq Eng & Eng Vib*, 16 (1), 23-32.

Experimental-numerical modeling of seismic behavior of dry sandy slopes reinforced by pile row

Hassan Sharafi^{1*}, Yazdan Shams Maleki²

Assistant professor of geotechnical engineering, Razi university, Kermanshah, Iran.

Geotechnical Engineering Ph.D student, Engineering Faculty, Razi university, Kermanshah, Iran.

h_sharafi@razi.ac.ir*

Abstract

In this study the behavior of model floating pile row with circular cross-section were installed inside the dry sandy slope by help of three-dimensional numerical analyses and physical modeling have been simultaneously studied. The three-dimensional numerical modeling was used for conducting the parametric studies about effects of directions of imposition of harmonic seismic loading on the main geotechnical parameters of floating pile row-sandy slope problem. The seismic loading of harmonic sinusoidal harmonic waves in the form of seismic motions in the in-plane and out-of-plane directions along the longitudinal and transverse directions of the small-scale slope model and both of them were imposed on the slope physical and numerical models. Moreover, the physical modeling of the investigating problem was implemented for validation of numerical results by imposing the sinusoidal harmonic loading in the longitudinal and transverse horizontal directions of small-scale slope model by help of small-scale geotechnical shaking table. Reinforcing of a dry sandy slope by a row of floating pile (similar to reinforcing of slope by an end-bearing pile row) results in significant decrease (to about more than 50 percent) in slope's vertical displacements. Out-of-plane components of seismic loading such as transverse component of earthquake, T component, (productive of horizontal shear waves, i.e., SH waves) also in the presence of site's effects such as *directivity effects* can produce the responses as large as the in-plane motion components such as earthquake longitudinal contained component, L (productive of P and SV seismic waves). The movement of slope sliding wedge in the strong ground motions is a rigid block motion while the failure wedge displacement under weak ground motions is a negligible motion and occur in a flexible block manner. Simultaneous seismic loading along two-axes of three coordinate axes in contrast to the current slope seismic loading that the seismic loading are imposed along one axis and in the longitudinal direction of slope failures surface, has great effects on the slope displacements values and internal efforts generated in the reinforcing pile row. Studying and solving the classic problem of in-plane and out-of-plane seismic-waves propagations in the combination with the existence of slope in the ground and pile row interaction (i.e., adding the pile row-slope seismic interaction to the initial classic problem) by help of present available analytical and mathematical solutions will be a very difficult problem. By combining of the in-plane and out-of-plane seismic motions the complexity of the pile row-sandy slope dynamic interaction problem will increase and in the some cases presenting analytical and closed-form solutions can be impossible. The alternative solutions for solving these complex problems proposed by the present paper are the simultaneous using of numerical and shaking table physical modeling for understanding the precise details and ambiguities of the problem in the complete scientific and practical-empirical frameworks. The results of present study show that installing a row of floating pile similar to the end-bearing pile row can reduce the displacements of loose dry sandy slope and through this manner the seismic stability of slope against the local and general failures has increased. In the present paper despite of increasing the directions of seismic loading from one-direction to the two-directions the installed floating pile row sufficiently played their roles in the reducing seismic displacements of slope. Indeed, according to the experimental-numerical results of the present paper, decreasing of slope crest settlements by installing a row of floating pile in the some seismic loading cases are more than 50 percent. The results of small-scale 2DOF geotechnical shaking table physical model were used to verify the obtained 3D numerical results. There is a good agreement between the numerical and physical models results.

Keywords: Floating pile row; seismic lading; effect of loading direction; dry sandy slope; physical model.