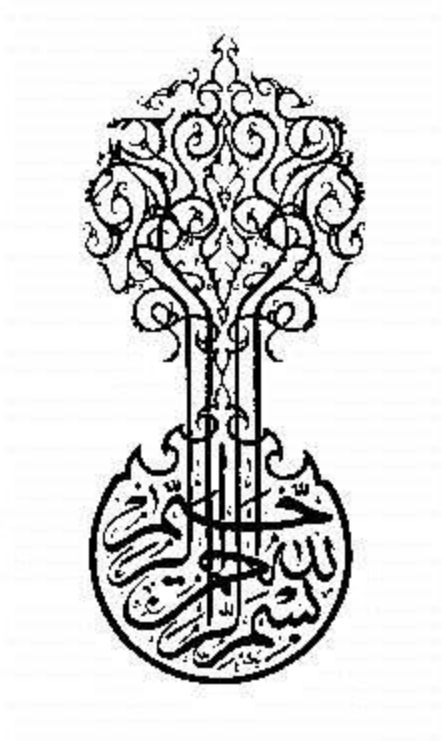
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه گیلان

دانشکده‌ی فنی – گروه مهندسی عمران

گرایش سازه

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

تأثیر بار دینامیکی بر سازه نگهبان مجاور به روش بدون شبکه

از:

عرفان زندی لک

استاد راهنما:

دکتر آرش بهار

دکتر مهدی ویس‌کرمی

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

پیش از هر چیز، جای دارد از زحمات پدر و مادر عزیزم تشکر کنم که همواره پشتیبان و مشوق من در تمام زندگی بوده‌اند.

زحمات اساتید بزرگوار راهنمای اینجانب (جناب آقای دکتر آرش بهار و جناب آقای دکتر مهدی ویس کرمی) نیز قابل تقدیر است که با راهنمایی‌های جامع خود اینجانب را در انجام هر چه بهتر این پژوهش همراهی نمودند.

همچنین از اساتید محترم کمیته‌ی داوری (جناب آقای دکتر جواد رزاقی و جناب آقای دکتر رضا جمشیدی چناری) در ارائه‌ی پیشنهادهای سازنده برای هر چه بهتر شدن این پایان‌نامه سپاسگزاری می‌شود. به علاوه از مدیریت محترم دپارتمان مهندسی عمران، استاد محترم جناب آقای دکتر میرعبدالحمید مهرداد، که با پشتیبانی خود در ارائه‌ی به موقع و مناسب این پایان‌نامه نقش شایانی داشتند، سپاسگزارم.

از کلیه‌ی اساتید محترم دپارتمان مهندسی عمران، دانشگاه گیلان و همچنین اساتید سابق خود در دانشگاه شیراز که همگی پایه گذار آینده‌ایی روشن برای دانشجویان خود، من‌جمله اینجانب بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان جای دارد از دوستان عزیزم، خانم‌ها و آقایان زهرا آقاجانی، محمد مفاخری، سید امین موسوی، شهریار پورعالی، میثم احمدی، مصطفی سفرپور، پارسا عالمی، یاسر شفیعی منش، مجید فلاحت‌پیشه و رضا نوری تشکر ویژه به عمل آورم.

چکیده

تأثیر بار دینامیکی بر سازه نگهبان مجاور به روش بدون شبکه

عرفان زندی لک

به نظر می رسد بدلیل وجود عوامل بسیاری که شدت و محل نیروهای طراحی روی سازه نگهبان (دیوار حائل) را تعیین می‌کنند، فشار دینامیکی خاک روی سازه‌های نگهبان که توسط ضربه بر پی ماشین آلات مجاور بوجود می آید، می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. در این تحقیق روش بدون شبکه MLPG برای تحلیل مسئله با هندسه‌های متفاوت محیط خاکی، پی و سازه نگهبان، مورد استفاده قرار می گیرد. فرض می شود که محیط خاکی، همگن و ویسکو-الاستیک است. در این تحقیق، روش MLPG که نسبتاً روش جدیدی است، مفصلاً شرح داده شده است و همچنین مسئله مورد نظر با روش MLPG تحلیل می شود. تعداد فراوانی از تحلیل‌ها انجام شده است تا تأثیر پارامترهایی چون فرکانس بار (برای بار چرخشی)، مکان و اندازه‌ی عرض پی و سرعت موج برشی خاک، بر روی مکان و بزرگای فشار دینامیکی خاک آشکار شود. نتایج، کارایی و انعطاف پذیری روش MLPG را نشان می دهند و همچنین یک محدوده ای بحرانی برای فرکانس نیرویی و مکان بارگذاری مشخص می کنند که در آن فشار مقاوم در طول مدت بارگذاری به حداکثر مقدار خود می رسد. ضمناً علاوه بر موضوع تحقیق، روش MLPG در محیط‌های الاستو-پلاستیک نیز پیاده شده است و مسئله، تحت بارگذاری زلزله مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: روش بدون شبکه، الاستیک، سازه نگهبان، بار دینامیکی.

فهرست مطالب

۱. فصل اول – کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تعریف مسئله ۱

۱-۳ روش تحقیق ۲

۱-۴ فصل بندی ۳

۲. فصل دوم– پیشینه پژوهش و مروری بر ادبیات فنی ۴

۲-۱ پیشینه تحقیق درباره نیروی مقاوم خاک ۴

۲-۲ تعریف روش‌های بدون شبکه ۴

۲-۳ دلایل نیاز به روش‌های بدون شبکه ۶

۲-۴ ایده‌ی روش‌های بدون شبکه ۷

۲-۵ پیشینه تحقیق درباره‌ی روش MLPG ۹

۳. فصل سوم– تئوری و فرمولاسیون مسئله ۱۰

۳-۱ مقدمه ۱۰

۳-۲ مکانیک جامدات و سازه‌ها ۱۰

۳-۳ اصول فرم‌های ضعیف ۱۳

۳-۴ ساخت تابع شکل در روش‌های بدون شبکه ۱۵

۳-۵ روش MLPG برای مسائل استاتیکی ۲۷

۳-۶ روش MLPG برای مسائل دینامیکی ۴۳

۴. فصل چهارم– آنالیز و نتایج ۵۷

۴-۱ مدل مسئله ۵۷

۴-۲ بار هارمونیک ۵۸
۴-۳ بار ضربه ۶۵

۵. فصل پنجم– مسائل الاستو پلاستیک ۶۹

۵-۱ معرفی مسائل الاستو پلاستیک ۶۹
۵-۲ روابط تنش-کرنش برای مصالح کاملاً پلاستیک ۷۰
۵-۳ معیاری برای بارگذاری و باربرداری ۷۱
۵-۴ افزایش تانسورهای کرنش الاستیک و پلاستیک ۷۲
۵-۵ نگاشت بازگشتی یا به هنگام کردن تنش ۷۴
۵-۶ الگوریتم برش صفحه (CPA) ۷۴
۵-۷ تابع تسلیم ۷۸
۵-۸ آنالیز مسئله‌ی الاستو پلاستیک ۸۱

۶. فصل ششم– جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۵

۷. منابع و مراجع ۸۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۳ - ۱ سه نوع تابع وزن و مشتقات آنها برای گره میانی ۲۰
شکل ۳ - ۲ توابع شکل و مشتقات آن در فضای یک بعدی ۲۵
شکل ۳ - ۳ تابع شکل و مشتقات آن در فضای دو بعدی برای گره میانی ۲۶
شکل ۳ - ۴ تابع شکل جند نقطه دلبخواه در فضای دو بعدی ۲۶
شکل ۳ - ۵ دامنه و مرزهای جابجایی و نیرویی مسئله، گره‌های توزیع شده و دامنه محلی ۳۰
شکل ۳ - ۶ دامنه مسئله، دامنه محلی، دامنه حامی و ابعاد آنها ۳۶
شکل ۳ - ۷ تیر کنسول و ابعاد آن ۳۹
شکل ۳ - ۸ توزیع منظم گره‌ها، روی دامنه و مرز مسئله و جزئیات دامنه‌ها برای دو گره‌ی منتخب ۴۱
شکل ۳ - ۹ تغییر شکل تیر کنسول در طول خط $\boldsymbol{y = 0}$ ۴۱
شکل ۳ - ۱۰ تنش‌های $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ در مقطع $\boldsymbol{x = 24m}$ ۴۲
شکل ۳ - ۱۱ مقدار خطای انرژی کرنشی برای مقادیر مختلف بی بعد دامنه‌ی محلی و دامنه‌ی حامی ۴۲
شکل ۳ - ۱۲ تغییرات خطای نسبی نسبت به تعداد سلول‌های پیش زمینه درون دامنه‌ی محلی برای مقادیر مختلف بی بعد دامنه‌ی محلی ۴۳
شکل ۳ - ۱۳ مرز VDB، عمود بر محور x ۴۵
شکل ۳ - ۱۴ دامنه و مرزهای جابجایی، نیرویی و VDB مسئله و دامنه‌ی محلی سه گره ۴۷
شکل ۳ - ۱۵ محیط نیمه بینهایت خاکی، تحت دو بار خطی استاتیکی محدود ۵۳
شکل ۳ - ۱۶ تنش‌های $\boldsymbol{\sigma_{zz}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{xz}}$ بدست آمده با روش‌های تحلیلی و MLPG ۵۴
شکل ۳ - ۱۷ مدل بدون شبکه‌ی یک محیط نیمه بینهایت خاکی، تحت بارگذاری دینامیکی عمودی ۵۴
شکل ۳ - ۱۸ حل عددی MLPG، حل FEM و حل تحلیلی جابجایی عمودی نقطه‌ی $(\boldsymbol{0, 0})$ ۵۵
شکل ۳ - ۱۹ توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{zz}}$ بدست آمده از روش (a) تحلیلی، (b) MLPG ۵۶
شکل ۳ - ۲۰ توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{xz}}$ بدست آمده از روش (a) تحلیلی، (b) MLPG ۵۶
شکل ۴ - ۱ مسئله مورد بررسی و پارامترهای هندسی ۵۷

شکل ۴ - ۲ مدل بدون شبکه‌ی مسئله و توزیع منظم گره‌ها ۵۸

شکل ۴ - ۳ مسئله تحلیل شده در زمان $\boldsymbol{t = 0.35\ s}$: (a) تابع نیرو (b) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ (c) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ (d) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ (e) بردارهای جابجایی (f) بردارهای سرعت ۵۹

شکل ۴ - ۴ مسئله تحلیل شده در زمان $\boldsymbol{t = 0.5\ s}$: (a) تابع نیرو (b) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ (c) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ (d) توزیع $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ (e) بردارهای جابجایی (f) بردارهای سرعت ۶۰

شکل ۴ - ۵ تنش σ_{xx} در طول دیوار در لحظات زمانی متفاوت ۶۱

شکل ۴ - ۶ تغییرات $\boldsymbol{\sigma_{xx}/\gamma H}$ نسبت به فاصله بین دیوار و بار در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار ۶۱

شکل ۴ - ۷ تغییرات ماکزیمم تنش نسبت به سرعت موج برشی خاک در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار ۶۲

شکل ۴ - ۸ تغییرات ماکزیمم تنش نسبت به فاصله‌ی بین دیوار و بارگذاری در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار، برای فرکانس‌های مختلف بارگذاری ۶۳

شکل ۴ - ۹ تغییرات DMF نسبت به فرکانس نیرو در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار، برای فواصل مختلف بین دیوار و بارگذاری ۶۴

شکل ۴ - ۱۰ تغییرات DMF برای فرکانس‌های نیرویی مختلف در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار، برای عرض‌های مختلف بارگذاری ۶۴

شکل ۴ - ۱۱ تغییرات تنش عمودی $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$، نسبت به ارتفاع دیوار در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار ۶۵

شکل ۴ - ۱۲ نمودار بار ضربه ۶۵

شکل ۴ - ۱۳ توزیع تنش‌های (a) $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ (b) $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ (c) $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ در زمان $\boldsymbol{t = 0.1\ s}$ ۶۶

شکل ۴ - ۱۴ توزیع تنش‌های (a) $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ (b) $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ (c) $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ در زمان $\boldsymbol{t = 0.8\ s}$ ۶۶

شکل ۴ - ۱۵ تاریخچه‌ی زمانی $\boldsymbol{\sigma_{xx}/\gamma H}$ در (a) بالای دیوار (b) وسط دیوار (c) پایین دیوار، برای عرض‌های مختلف بارگذاری ۶۷

شکل ۴ - ۱۶ (a) تاریخچه تنش عمودی در بالای دیوار برای ضخامت‌های مختلف خاک زیر دیوار (b) تغییرات تنش عمودی در بالای دیوار نسبت به ضخامت خاک زیر دیوار برای ۳ لحظه‌ی زمانی متفاوت ۶۷

شکل ۴ - ۱۷ (a) تغییرات تنش عمودی در طول دیوار برای نسبت‌های میرایی متفاوت (b) تغییرات تنش عمودی برای نسبت‌های میرایی برای نقاط مختلف دیوار ۶۸

شکل ۵ - ۱ نمودار تنش-کرنش تک محوری یک ماده‌ی کاملاً پلاستیک ۷۰

شکل ۵ - ۲ یک ارائه هندسی از سطح تسلیم و معیار بارگذاری و باربرداری ۷۱

شکل ۵ - ۳ خط کامل: برش مدل هرمی کولمب توسط صفحه‌ی $\boldsymbol{\sigma_1 - \sigma_2}$ (مدل دو محوری کولمب). خط چین: تصویر مدل هرمی کولمب روی صفحه‌ی $\boldsymbol{\sigma_1 - \sigma_2}$ (مدل کرنش مسطح کولمب). ۸۱

شکل ۵ - ۴ مدل بدون شبکه دامنه‌ی مسئله ۸۲

شکل ۵ - ۵ شتاب زلزله که در $\boldsymbol{0.35g}$ مقیاس شده است ۸۳

شکل ۵ - ۶ توزیع تنش‌های (a) $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ (b) $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ (c) $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ در زمان $\boldsymbol{t = 20\ s}$ ۸۳

شکل ۵ - ۷ تاریخچه‌ی میانگین تنش‌های $\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{xy}}$ بوجود آمده در طول دیوار ۸۳

شکل ۵ - ۸ تاریخچه‌ی مکان برآیند نیروی زلزله بر دیوار ۸۴

شکل ۵ - ۹ گشتاور واژگونی حول پای دیوار ۸۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۱- ۱ تعدادی از روش‌های بدون شبکه همراه با ویژگی‌ها.....۹

فهرست علائم اختصاری

علائم لاتین

a	بردار جریان
B	عرض فونداسیون
$\boldsymbol{b}$	بردار نیروی پیکره خارجی
c	ضریب چسبندگی خاک
c_1	ضریب مرز میرای لزج
c_2	ضریب مرز میرای لزج
$\boldsymbol{D}$	ماتریس ثابت‌های الاستیسیته مواد
$\boldsymbol{D}^{ep}$	مدول پیوسته‌ی الاستو پلاستیک
d_c	طول مشخصه
d_s	بعد دامنه‌ی حامی
$d\lambda$	پارامتر پایداری (پلاستیسیته)
E	مدول الاستیسیته
f	تابع تسلیم
f_t	مقاومت کششی خاک
H	ارتفاع دیوار حائل
h_1	ضخامت خاک زیر دیوار
I_1	اولین تانسور تغییرناپذیر تنش

J_2	دومین تغییر ناپذیر از تانسور انحرافی تنش
J_3	سومین تغییر ناپذیر از تانسور انحرافی تنش
J_q^D	ماتریس جاکوبین برای سطح دوبعدی دامنه‌ی محلی
J_{qt}^B	ماتریس جاکوبین برای مرز یک بعدی Γ_{Qu}
J_{qu}^B	ماتریس جاکوبین برای مرز یک بعدی Γ_{Qt}
k	تعداد نقاط گاؤسی در هر سلول در یک جهت
$\boldsymbol{L}$	ماتریس اپراتور دیفرانسیلی
L	فاصله‌ی بین فونداسیون و دیوار
m	تعداد جمله‌های چند جمله‌ای پایه
n	تعداد گره‌ها در دامنه‌ی حامی
n_c	تعداد سلول‌ها در دامنه‌ی محلی در یک جهت
n_g	کل تعداد نقاط گاؤسی در دامنه‌ی محلی
n_{gt}	کل تعداد نقاط گاؤسی روی مرز دامنه‌ی محلی
n_t	تعداد کل گره‌های توزیع شده در دامنه‌ی مسئله
P	نیروی وارد بر پی
$\bar{t}$	نیروی وارد بر مرز مسئله
$\boldsymbol{u}$	بردار جابجایی
$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})$	متغیر میدان
$\boldsymbol{u}^h(\boldsymbol{x})$	تقریب متغیر میدان
$\widehat{\boldsymbol{W}}$	تابع وزن (تست)

$\widehat{w}_k$	ضریب وزنی گاؤس
$\boldsymbol{x}_Q$	نقطه‌ی گاؤسی

علائم یونانی

α	ضریب میرایی ریلی
α_Q	اندازه‌ی بی بعد دامنه‌ی محلی
α_s	اندازه‌ی بی بعد دامنه‌ی حامی
β	ضریب میرایی ریلی
Γ	مرز دامنه‌ی مسئله
Γ_e	مرزی از دامنه‌ی مسئله که نیروی زلزله در آنجا اعمال می‌شود (مرز لرزه‌ای)
Γ_r	مرز میرای لزج
Γ_t	مرز نیرویی
Γ_u	مرز جابجایی
Γ_Q	مرز دامنه‌ی محلی
ε	بردار کرنش
ε_e	خطای انرژی کرنشی
ε^{exact}	بردار کرنش بدست آمده از حل دقیق تحلیلی
ε^{num}	بردار کرنش بدست آمده از حل عددی
ε_{ij}^e	مؤلفه‌ی الاستیک بردار کرنش
ε_{ij}^P	مؤلفه‌ی پلاستیک بردار کرنش
η	ثابت ماده در مدل دراکر-پراگر

η_c	ضریب میرایی
θ	زاویه‌ی لد (Lode Angle)
υ	ضریب پوآسون
ξ	ثابت ماده در مدل دراکر-پراگر
ρ	چگالی جرمی خاک
σ	بردار تنش
σ_c	تنش محصور شده (Confined)
Φ	ماتریس تابع شکل
ϕ	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک
ψ	تابع پتانسیل
Ω	دامنه‌ی مسئله
Ω_Q	دامنه‌ی محلی
Ω_s	دامنه‌ی حامی
Ω_w	دامنه‌ی تابع وزن

۱. فصل اول – کلیات

۱-۱ مقدمه

مسئله‌ی انتشار موج در محیط‌های الاستیک و ویسکو الاستیک، مسئله‌ی مهمی در علم مهندسی است و همواره توجه خاصی به این مسئله می شود. در قرن گذشته، علاوه بر امواج منتشر شده‌ی زلزله، موارد دیگری از منابع انتشار موج نیز توسط انسان بوجود آمدند. پی‌های ماشین آلاتی، کوبیدن شمع‌ها، بارهای ترافیکی، انفجار، فعالیت ماشین آلات ساختمانی و ... از جمله منابع انتشار موج در محیط‌های خاکی هستند. تأثیری که امواج ذکر شده می توانند بر سازه‌ها یا محل‌های خاکبرداری شده در همسایگی منبع موج بگذارند، موجب افزایش علاقه‌ی مهندسین برای مطالعه در این زمینه شده اند. یکی از پر کاربردترین و مؤثرترین روش‌ها برای مقابله با این امواج و پایدار کردن خاک، استفاده از سازه نگهبان (یا دیوار حائل) است.

همانطور که می‌دانیم، تحلیل دینامیکی محیط خاک به زمان طولانی و تلاش‌های محاسباتی بسیاری نیازمند است. بنابراین یک برآورد از حل مسئله می‌تواند مهم‌تر و کاربردی‌تر از حل دقیق مسئله باشد. بر خلاف کارهای انجام شده بر اساس روش‌های شبه استاتیکی، خیلی راحت‌تر است که با کمک ابزارهای محاسباتی و کامپیوترهایی با سرعت محاسباتی بالا، از روش‌های عددی برای تحلیل مسائل دینامیکی استفاده کنیم. در این تحقیق، تمام مسائل با استفاده از نرم افزار MATLAB® برنامه نویسی شده‌اند، فلوچارت ها نیز به صورت کامل نمایش داده شده‌اند.

۱-۲ تعریف مسئله

در این تحقیق، سعی در بررسی سازه‌های نگهبان واقع در محل‌هایی که تحت خاکبرداری‌های عمیق و مجاور بارهای دینامیکی عمودی (مانند فعالیت ماشین‌های صنعتی، ضربات ماشین آلات ساختمانی، بارهای ترافیکی بزرگراه‌های مجاور و ...) هستند را داریم. بدین منظور دو لایه خاک همجنس، همگن و الاستیک داریم که خاک بالایی از یک سمت توسط دیوار حائل وزنی صلب، نگه داشته شده است و از سمت دیگر بی نهایت است، مرز بالایی این خاک آزاد است و روی آن یک پی با عرض مشخص که تحت بارگذاری دینامیکی است، قرار گرفته است. پی ذکر شده در یک فاصله معین نسبت به دیوار حائل واقع شده است. خاک و دیوار ذکر شده روی خاکی قرار دارند که از دو طرف بی نهایت و در مرز پایین گیردار است. در این مسئله، شدت بار در حدی است که موجب می شود فرض کنیم خاک به صورت الاستیک رفتار می کند.

یکی از روش‌های عددی، برای تحلیل دینامیکی مسئله استفاده می‌شود. تعداد زیادی از تکنیک‌های عددی که اساس آنها می‌تواند با شبکه یا بدون شبکه باشد، توسعه یافته‌اند که هر کدام فواید خاص خود را دارند. روش‌های بدون شبکه به عنوان ابزارهای موفق و فاقد محدودیت‌هایی که روش‌های متداول عددی شبکه بندی شده دارا هستند، شناخته شده هستند. روش‌های بدون شبکه می توانند برای هر مسئله با هر دامنه و مرز دلبخواهی بکار برده شوند. در این تحقیق از روش بدون شبکه MLPG[1] استفاده شده است و بیشتر حجم این تحقیق صرف شناسایی و بدست آوردن فرمول‌های روش MLPG شده است و شرایط خاص مسئله، مانند جدا کردن[2] مرز بین دیوار و خاک و همچنین شبیه سازی دامنه نیمه بینهایت محیط خاکی در فرمول‌های MLPG گنجانده شده است. در این تحقیق، روش MLPG در محیط الاستو پلاستیک که فراتر از هدف این تحقیق است نیز بکار برده شده است. امید است که این تحقیق موجب قدرتمند تر شدن و گسترش محدوده فعالیت‌های روش MLPG در محیط‌های مختلف شده باشد.

۱-۳ روش تحقیق

در این تحقیق مایل هستیم تأثیر بارهای دینامیکی روی یک محیط نیمه بینهایت خاکی که توسط دیوار وزنی صلب نگه داشته شده است را بیابیم. بنا بر چندین دلیل، خواهان استفاده از یکی از روش‌های بدون شبکه برای تحلیل مسئله شده ایم. یک اینکه روش‌های بدون شبکه بدلیل نداشتن شبکه، روش‌های انعطاف پذیر تری هستند و می توان آنها را در مدل‌های پیچیده استفاده کرد و دوم علاقه‌ی نویسنده به یادگیری این روش‌ها و استفاده از ویژگی‌های این روش‌ها در سوژه‌ی تحقیق پیش رو و مسائل مختلف و جذاب دیگر است. در این تحقیق از روش بدون شبکه MLPG استفاده شده است. اساس روش MLPG، فرم ضعیف محلی است، بدین منظور که معادلات تعادل که به فرم ضعیف هستند، باید در یک دامنه‌ی کوچک محلی ارضا شوند.

مدل مورد مطالعه در این تحقیق، یک مدل دو بعدی، الاستیک و کرنش مسطح است و برای تحلیل این مدل با روش MLPG، تعدادی گره در سطح مدل پخش شده است. برای محاسبه تقریب متغیر میدان در هر گره، از روش حداقل مربعات متحرک (MLS[3]) بهره گرفته شده است. با قرار دادن تقریب متغیر میدان در معادله تعادل و با استفاده از روش باقیمانده وزنی، معادله تعادل به فرم ضعیف تبدیل شده است. سپس به بررسی معادله تعادل در هر گره پرداخته شده است. همچنین با

[1] Meshless Local Petrov-Galerkin

[2] de-bonding

[3] Moving Least Squares

استفاده از روش بخصوصی، شرایط مرزی را تحمیل شده است. در ابتدا، مسئله برای بارگذاری استاتیکی تحلیل شده است، سپس بارگذاری دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. با روی هم سوار کردن[1] معادله تعادل مربوط به هر گره، برای تحلیل استاتیکی، به یک سری سیستم معادلات جبری خواهیم رسید که به صورت ماتریس سختی و بردار نیرویی و جابجایی در آمده بودند و برای تحلیل دینامیکی به یک سری سیستم معادلات گسسته‌ی دیفرانسیلی رسیدیم که شامل ماتریس‌های کلی جرم، سختی و میرایی و بردارهای نیرویی و جابجایی و مشتقات بردار جابجایی، بودند. سپس سیستم معادلات دیفرانسیلی با کمک روش نیومارک حل می شود و با استفاده از حل بدست آمده، تنش‌ها محاسبه می شوند. در انتها، تأثیر پارامترهای هندسی مسئله و ویژگی‌های نیروی دینامیکی، روی تنش‌های توزیع شده در گستره محیط خاکی و دیوار حائل بررسی می شوند.

در فصل آخر این تحقیق تأثیر نیروی زلزله روی محیط خاکی بررسی می شود و بدلیل بزرگ بودن اندازه‌ی نیرو، ناگزیر به حل مسئله در محیط الاستو پلاستیک شدیم.

۱-۴ فصل بندی

فصل اول به کلیاتی از تحقیق نسبت داده شده است و به تعریف مسئله و روش تحقیق پرداخته است.

فصل دوم به پیشینه‌ی پژوهش درباره‌ی نیروی مقاوم خاک و همچنین روش بدون شبکه پرداخته است و دلایل نیاز به روش‌های بدون شبکه و ایده‌ی روش‌های بدون شبکه مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در فصل سوم تئوری و فرمولاسیون روش MLPG برای مسائل استاتیک و دینامیک شرح داده شده است و برای هر کدام مثالی با روش MLPG حل می شود و با جواب‌های تحلیلی مقایسه می شوند تا دقت جواب‌های روش MLPG تأیید شود.

در فصل چهارم مسئله مورد نظر با استفاده از روش شرح داده شده در فصل قبل، یعنی روش MLPG تحلیل می شود و نتایج آنالیز با شکل و نمودار به نمایش گذاشته می شود.

در فصل پنجم روش MLPG وارد مسائل الاستو پلاستیک می شود و مسئله‌ی مورد نظر تحت نیروی زلزله تحلیل می شود. این فصل، مضاف بر موضوع تحقیق است.

فصل ششم به جمع بندی، نتیجه گیری و ارائه‌ی پیشنهادات می پردازد.

[1] assembling

۲. فصل دوم– پیشینه پژوهش و مروری بر ادبیات فنی

۲-۱ پیشینه تحقیق درباره نیروی مقاوم خاک

مسائل فشار مقاوم خاک تحت بارگذاری استاتیکی به کارهای نخستین Coulomb (1776) یا Rankine (1857) باز می گردد. روش کلاسیک مونونوبه-اکابه[1] برای ضرائب فشار دینامیکی خاک، بدست آمده از روش شبه استاتیکی، به صورت دانشگاهی مورد قبول و استفاده قرار گرفته است (Okabe (1926)، Mononobe and Matsuo (1929)).

از دهه‌ی ۷۰ میلادی به طور گسترده روش‌های شبه-استاتیکی برای نیروهای لرزه‌ای و فشار استاتیکی خاک بر روی دیوارهای حائل، توسعه یافته اند که می توان میان آنها از کارهای Sabzevari and Ghahramani (1972)، Wood (1973)، Habibagahi and Ghahramani (1979)، Ghahramani and Clemence (1980) و Veletsos and Younan (1994) تا کارهای انجام شده در دهه‌ی اخیر (مانند Soubra (2000)، Kumar (2001)، Subba Rao and Choudhury (2005) و Gosh and Sharma (2012)) نام برد. بیشتر این تلاش‌ها با فشار لرزه‌ای خاک بر سازه نگهبان سر و کار دارند و مطالعه قابل توجهی درباره تأثیر بار دینامیکی عمودی وارد بر فونداسیون‌های مجاور، صورت گرفته نشده است.

۲-۲ تعریف روش‌های بدون شبکه

طراحی سیستم‌های پیشرفته‌ی مهندسی، احتیاج به کمک‌های کامپیوتری (CAD[2]) دارد. در چنین کمک‌هایی، اغلب تکنیک‌های محاسباتی شبیه سازی، برای مدل سازی و مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی، مربوط به یک سیستم مهندسی، مورد استفاده قرار می گیرند. شبیه سازی به حل معادلات پیچیده دیفرانسیلی یا دیفرانسیلی جزئی که حاکم بر پدیده‌های ذکر شده است، نیاز دارد. به صورت سنتی، چنین معادلات جزئی پیچیده، اکثراً با استفاده از روش‌های عددی، مانند روش عناصر محدود (FEM[3]) و روش تفاضل محدود (FDM[1]) حل می‌شوند. در چنین روش‌هایی، دامنه‌ی فضایی، که معادلات دیفرانسیلی جزئی

[1] Mononobe-Okabe

[2] computer-aided design

[3] Finite Element Method

حاکم، در آنجا تعریف می‌شوند، به شبکه[2]هایی گسسته می‌شود. یک شبکه می‌تواند به عنوان فضاهای باز یا فضاهای بین تار-های توری شکلی که بوسیله‌ی اتصال گره[3]هایی از پیش تعریف شده شکل گرفته اند، تعریف شود. شبکه‌های به کار برده شده در روش تفاضل محدود معمولاً گرید[4] و در روش عناصر محدود، عنصر[5] نامیده می شوند. در اینجا سخن کلیدی این است که، یک شبکه باید از پیش تعریف شود تا بتواند بین گره‌ها رابطه‌ی معینی را آماده کند، که این ویژگی اساس فرمولاسیون چنین روش‌های عددی متداول است.

با استفاده از شبکه‌های از پیش تعریف شده‌ی مناسب و با اعمال یک اصل مناسب، معادلات پیچیده دیفرانسیلی یا دیفرانسیلی جزئی حاکم، می توانند بوسیله یک سری معادلات جبری برای هر یک از شبکه‌ها تقریب زده شوند. با روی هم سوار کردن سری معادلات جبری همه شبکه‌ها، سیستم معادلات جبری مربوط به کل دامنه تشکیل می‌شود.

روش بدون شبکه[6] استفاده می‌شود تا سیستم معادلات جبری را برای کل دامنه مسئله، بدون استفاده از شبکه‌های از پیش تعریف شده، برقرار کند. روش بدون شبکه از یک سری گره‌های پخش شده روی دامنه و مرزهای مسئله، برای نمایش دامنه و مرز مسئله، استفاده می‌کند. این سری گره‌های پخش شده، شبکه‌ای را تشکیل نمی‌دهند، که این یعنی ما نیازمند به اطلاعات درمورد رابطه‌ی بین گره‌ها، حداقل برای درون یابی متغیر میدان، نداریم.

تعدادی از روش‌های بدون شبکه وجود دارند، مانند: روش بدون المان گالرکین (EFG[7]) از Belytschko et al. (1994)، روش بدون شبکه پتروف-گالرکین محلی (MLPG) از Atluri and Zhu (1998)، روش درون یابی نقطه‌ای (PIM[8]) از Liu, G. R. and Gu (1999)، روش سوار کردن نقطه (PAM[9]) از Liu, G. R. (1999)، روش نقطه محدود[10] از

[1] Finite Difference Method

[2] mesh

[3] node

[4] grid

[5] element

[6] mesh free

[7] Element Free Galerkin

[8] Point Interpolation Method

[9] Point Assembly Method

[10] Finite Point Method