

چکیده

با توجه به استفاده گسترده از شمع‌ها در سازه‌های مختلف، دانش فنی و روش‌های اجرایی و نیز طراحی این نوع پی‌های عمیق، نیازمند مطالعه‌ی بسیار و نوآوری می‌باشد. در این مقاله، به بررسی و تحلیل رفتار کوبشی شمع‌های پیش‌ساخته از انواع بتن سبک با مقاطع استوانه‌ای و مخروطی پرداخته شده که این مسئله موجب شناخت بیشتر این فرآیند و در نتیجه افزایش راندمان عملیات کوبش شمع‌ها می‌گردد. از جمله روش‌های بررسی مسائل کوبش، استفاده از روش عددی تفاضل محدود می‌باشد، به گونه‌ای که بتوان به شکلی منطقی رفتار شمع و خاک را در هنگام کوبش شمع مدل‌سازی نمود. بدین منظور، ابتدا انتشار موج در اثر اعمال بار ضربه به رأس یک میله‌ی الاستیک بررسی شده و سپس با مدل‌سازی شمع استوانه‌ای و مخروطی و تخصیص مشخصات مکانیکی انواع بتن سبک به آنها، رفتار این گونه شمع‌ها نیز تحت کوبش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها، استنباط می‌شود که سرعت انتشار موج در میله‌های ساخته شده از بتن سبک تیپ L3 و S2 بیشتر از میله‌های با بتن معمولی و سایر طرح اختلاط‌ها می‌باشند. همچنین شمع‌های بتنی سبک دارای رفتار مشابهی مانند بتن‌های معمولی در حین کوبش بوده و دارای عملکرد بهتری نیز نسبت به بتن معمولی هستند. این مسئله علاوه بر کاهش وزن شمع‌های بتنی پیش‌ساخته، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی شمع کوبی شده و همچنین با انتخاب طرح اختلاط مناسب و بیشتر شدن میزان نفوذ نهایی، افزایش راندمان شمع کوبی حاصل می‌گردد.

واژگان کلیدی: شمع پیش‌ساخته، بتن سبک، پاسخ دینامیکی، انتشار موج، کوبش شمع، شمع مخروطی، روش تفاضل محدود

بررسی انتشار موج در شمع‌های پیش‌ساخته از بتن سبک و مشخصات رفتاری آنها در حین کوبش

امید توسلی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

o.tavasoli@iauet.ac.ir

محمود قضاوی

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۱- مقدمه

سبک در فرآیند شمع کوبی و اثرات آن می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

تولید و استفاده از بتن سبک، امروزه در پروژه‌های عمرانی به سرعت در حال افزایش بوده و دامنه‌ی کاربری آنها با در نظر گرفتن مشخصات مکانیکی مناسب و قابل قبول، برای ساخت انواع سازه‌ها در حال بررسی و توسعه می‌باشد. پژوهشگران بسیاری نشان دادند که این نوع بتن به دلیل وجود حفرات هوای موجود در سبک‌دانه‌ها، دارای نسبت بالای مقاومت به وزن، ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاومت کششی مناسب و ویژگی‌های برتر عایق بودن در مقابل گرما و صدا را دارد که

در پژوهش‌های بسیاری رفتار شمع‌های تحت کوبش و همچنین خواص بتن سبک به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته که در اغلب آنها شمع‌های بتنی دارای سطح مقطع ثابت بوده و از بتن معمولی با وزن مخصوص بالا ساخته شده‌اند. در تحقیقات گذشته، بررسی اثر هندسه و شکل شمع و همچنین جنس آن از بتن سبک، در مسائل کوبش به صورت مفهومی و کاربردی بیان نشده است، به طوری که بررسی رفتار واقعی آنها با استفاده از آزمایش یا روش‌های عددی به طور وسیع و کامل انجام نگرفته و جایگاه این موضوع در ادبیات فنی بسیار ضعیف است؛ بنابراین بررسی تأثیر هندسه‌ی شمع‌های ساخته شده با بتن

راندمان و عملکرد شمع نسبت به شمع‌های ته‌بسته بیشتر می‌باشد. در مجموع شمع مخروطی ته‌باز عملکرد بهتری نسبت به سایر شمع‌ها با هندسه‌ی مختلف دارد.

در این تحقیق رفتار کوبشی شمع‌های بتنی پیش‌ساخته از بتن سبک به کمک مدل‌سازی با استفاده از روش‌های عددی در حالت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این مسائل می‌توان به تأثیر مشخصات مکانیکی بتن‌های سبک استفاده شده در ساخت شمع‌های پیش‌ساخته با توجه به طرح اختلاط‌های مختلف، تأثیر هندسه‌ی شمع از قبیل شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی بر نحوه‌ی فرآیند کوبش شمع‌های بتنی سبک مانند نحوه‌ی انتشار امواج ایجاد شده در آن، میزان نفوذ و سرعت شمع در اثر ضربات مختلف اشاره نمود.

۲- بررسی و تحلیل انتشار موج در یک میله از جنس

بتن سبک

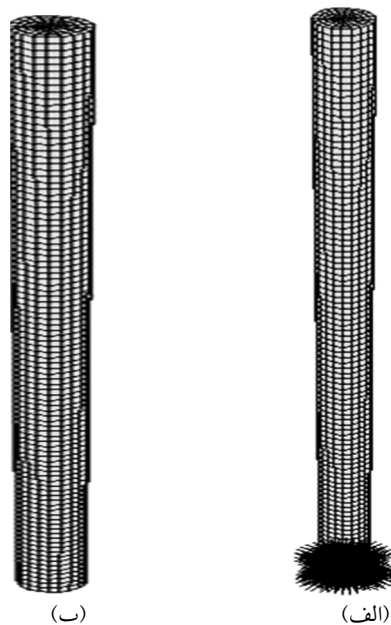
در این قسمت، به بررسی و تحلیل انتشار موج در یک میله‌ی الاستیک به طول ۲۰ متر و قطر ۵۰ سانتی‌متر با شرایط انتهایی متفاوت که تحت یک ضربه قرار می‌گیرند، با استفاده از برنامه‌ی FLAC سه‌بعدی پرداخته شده است. بدین منظور دو سری تحلیل‌های مختلف به ازای میله با انتهای گیردار و میله با انتهای آزاد انجام شده و به‌منظور مطالعه‌ی دقیق خصوصیات موج فشاری به وجود آمده، در اطراف و جداره‌ی میله هیچ‌گونه خاک یا تکیه‌گاهی در نظر گرفته نشده است. شکل (۱)، هندسه‌ی میله و شرایط مرزی را به ازای تکیه‌گاه‌های مختلف در حالت سه‌بعدی نشان داده است.

همان‌طور که در قبل توضیح داده شد، صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار FLAC3D با مدل‌سازی سیستم شمع و خاک در فرآیند کوبش توسط قضاوی و توسلی [۱۵] و توسلی و قضاوی [۱۶] مورد بررسی و تشریح قرار گرفته است. همچنین جهت تعیین طرح اختلاط و مشخصات مقاومتی انواع بتن سبک، در این تحقیق پارامترهای مکانیکی بتن سبک که در پژوهش خانزادی و چاله‌کایی [۶] مورد ارزیابی قرار گرفته، استفاده می‌شود.

مخروطی در خاک ماسه‌ای متراکم را مورد بررسی قرار داده و استنباط نمودند که شمع مخروطی دارای عملکرد بهتری نسبت به شمع استوانه‌ای می‌باشد. رفتار شمع‌های بتنی با مقاطع متغیر در حین کوبش نیز توسط قضاوی و توسلی [۱۵] با مدل‌سازی شمع و خاک به کمک روش تفاضل محدود مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان با مدل‌سازی سیستم شمع-خاک با نرم‌افزار FLAC مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج تحقیقات گذشته، صحت عملکرد نرم‌افزار را ارزیابی کرده و سپس تحلیل رفتار شمع‌های بتنی توپر با مقاطع متغیر تحت کوبش انجام شده است. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که سرعت و نشست نهایی شمع با افزایش زاویه‌ی جداره در شمع‌های با مقاطع غیر یکنواخت بیشتر می‌شود. همچنین تغییر هندسه‌ی مقطع شمع بر میزان نشست نهایی و سرعت تأثیر مستقیم داشته، به‌طوری‌که جابه‌جایی شمع مخروطی از همه بیشتر بوده و شمع استوانه‌ای دارای کمترین نشست می‌باشد و رفتار شمع‌های دارای مقطع ترکیبی استوانه‌ای-مخروطی بسته به شکل آن، در بین این دو مقدار قرار گرفته است. توسلی و قضاوی [۱۶] به بررسی و تحلیل فرآیند کوبش شمع‌های پیش‌ساخته‌ی فلزی استوانه‌ای و مخروطی با طول و حجم یکسان پرداختند. ایشان با انجام آزمایش‌های واقعی و مدل‌سازی عددی به کمک روش تفاضل محدود، رفتار شمع و خاک را در هنگام کوبش مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌ها در خاک ریز ماسه‌ای سست انجام شده و ثبت داده‌ها شامل تعداد ضربات کوبش، سرعت و نیروی شمع با استفاده از دستگاه PDA انجام گرفته است. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های با مقاطع غیر یکنواخت در عملیات شمع‌کوبی علاوه بر کاهش مصرف انرژی به میزان بین ۲۵ تا ۶۰ درصد، موجب افزایش راندمان و بهره‌وری عملیات کوبش نیز می‌شود. همچنین در حالت‌های بسته یا باز بودن انتهای شمع، شمع‌های مخروطی دارای نشست نهایی بیشتری نسبت به شمع‌های استوانه‌ای بوده و با تعداد ضربات کمتری در خاک کوبیده می‌شوند و میزان نشست نهایی و سرعت شمع مخروطی ته‌باز از شمع استوانه‌ای ته‌باز بیشتر بوده و در حالتی کلی نیز وقتی انتهای شمع به‌صورت ته‌باز باشد،

آنها با ماسه‌ی طبیعی جایگزین شده، شش مخلوط گوناگون در نظر گرفته شده، حروف S و L در عنوان هر طرح اختلاط، به ترتیب بیانگر بتن حاوی اسکوریا و لیکا می‌باشند. در تمامی طرح اختلاط‌ها، بتن با ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی و نسبت وزنی سیمان به مواد سیمانی ۰/۳ طراحی شده، به طوری که ۴۵۰ کیلوگرم سیمان پرتلند نوع یک با ۵۰ کیلوگرم دوده‌ی سیلیسی و فوق روان کننده به میزان یک درصد وزنی سیمان ترکیب شده است. میزان مصالح تشکیل دهنده و نسبت اختلاط آنها در انواع بتن سبک در جدول (۱) آورده شده است.

در جدول (۲)، مشخصات مکانیکی انواع بتن سبک بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته‌ی استاتیکی، ضریب پواسون و مدول برشی بتن که بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی متری و استوانه‌ای استاندارد انجام شده و همچنین وزن مخصوص خشک نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل (۱): مدل سازی سه بعدی میله‌ی الاستیک بتنی با انتهای (الف) گیردار (ب) آزاد.

بدین منظور برای مقایسه‌ی حجم سبک‌دانه‌ها با مشخصات فیزیکی بتن که در آنها سبک‌دانه‌ها به مقدار ۱۰ درصد حجمی

جدول (۱): میزان مصالح تشکیل دهنده و نسبت اختلاط آنها در انواع بتن سبک بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب [۶].

نام اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	درشت دانه	ریزدانه	آب آزاد	وزن مخصوص بتن تازه
L1	۴۵۰	۵۰	۳۱۵	۷۳۰	۱۵۰	۱۷۱۵
L2	۴۵۰	۵۰	۲۶۰	۸۶۰	۱۵۰	۱۷۹۰
L3	۴۵۰	۵۰	۲۰۵	۹۹۰	۱۵۰	۱۸۶۵
S1	۴۵۰	۵۰	۵۹۵	۷۲۸	۱۵۰	۱۹۹۸
S2	۴۵۰	۵۰	۵۰۱	۸۵۸	۱۵۰	۲۰۳۴
S3	۴۵۰	۵۰	۴۰۷	۹۸۸	۱۵۰	۲۰۷۰

جدول (۲) مشخصات مکانیکی انواع بتن سبک بر اساس نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف [۶].

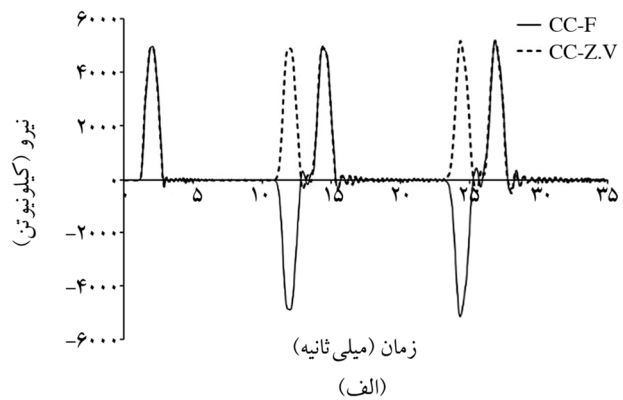
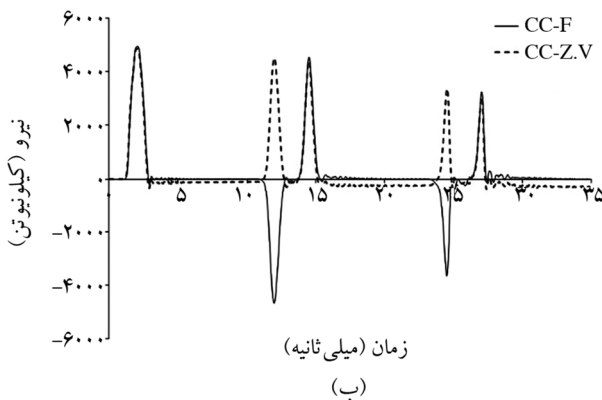
نام اختلاط	مقاومت فشاری مکعبی (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری استوانه‌ای (مگاپاسکال)	وزن مخصوص خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)
L1	۳۳/۲۰	۳۰/۵۴	۱۵۸۵	۱۴/۹۰	۰/۱۹	۶/۲۶
L2	۳۶/۲۹	۳۳/۷۵	۱۶۶۰	۱۵/۶۷	۰/۱۸	۶/۶۴
L3	۴۰/۸۵	۳۸/۴۰	۱۷۳۵	۱۸/۵۷	۰/۱۹	۷/۸۰
S1	۴۵/۳۵	۳۹/۰۰	۱۸۶۸	۱۶/۸۸	۰/۲۰	۵/۷۰
S2	۵۰/۴۶	۴۳/۹۰	۱۹۰۴	۲۱/۲۷	۰/۲۲	۷/۴۴
S3	۶۳/۵۴	۶۲/۴۸	۱۹۴۰	۳۰/۱۹	۰/۲۲	۶/۸۹

به‌منظور ثبت نتایج سرعت و نیرو بر اثر ضربه، نقطه‌ای در ۵ متر پایین تر از رأس شمع در نظر گرفته می‌شود. پس از تحلیل، نمودارهای تغییرات نیرو و سرعت با زمان نشان داده شده به طوری که سرعت در ضربه امیدانس میله ضرب شده تا تبدیل به نیرو شود. این فرآیند دقیقاً مطابق آنچه در خروجی‌های آزمایش PDA دیده می‌شود، انجام می‌شود که جهت محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع با تکنیک انطباق سیگنال و روش تحلیلی CAPWAP که متکی بر نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع است، استفاده می‌شود. در واقع برداشت‌های سرعت و نیروی سر شمع، داده‌هایی هستند که برای تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. محور افقی می‌تواند بر پایه‌ی L/C که برابر زمان لازم برای انتقال موج از رأس به نوک میله می‌باشد و یا زمان بر حسب میلی‌ثانیه تقسیم‌بندی شود که در اینجا تمام نمودارها بر حسب زمان ترسیم شده‌اند. نتایج پاسخ دینامیکی میله از انواع مختلف بتن با انتهای آزاد تحت اثر ضربه در حالت‌های بدون میرایی و میرایی یک درصد در شکل‌های (۲) الی (۸) نشان داده شده است.

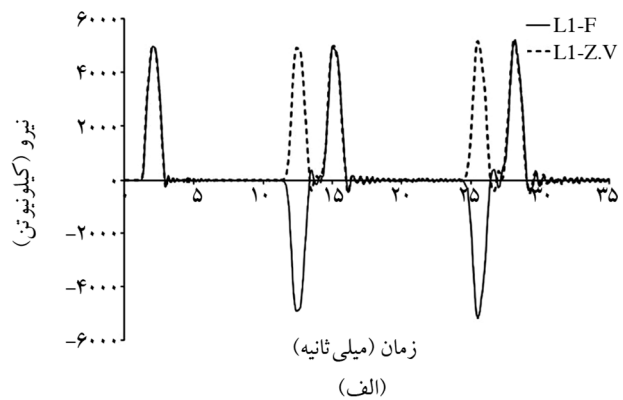
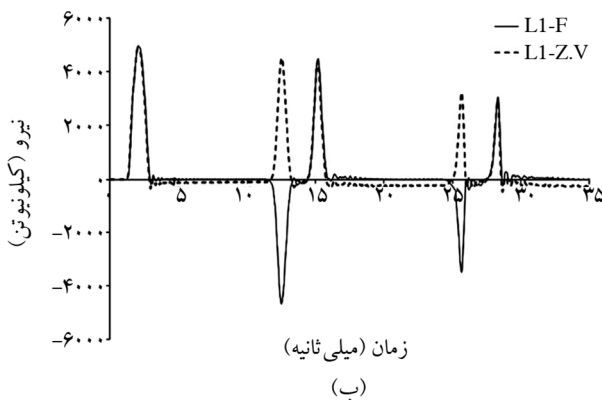
مدل رفتاری میله به صورت الاستیک در نظر گرفته شده و مشخصات مکانیکی بتن معمولی مانند مدول الاستیسیته برابر ۲۴۸۰۰ مگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۱۵ و جرم مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب لحاظ گردیده است. اندازه‌ی المان‌ها جهت مدل‌سازی میله مطابق شکل (۱)، به میزان ۵ سانتی‌متر انتخاب و همچنین در تمامی تحلیل‌ها از وزن میله صرف‌نظر شده است. یک ضربه به صورت یک تنش نیم سینوسی با دامنه‌ی ۵ مگا پاسکال و فرکانس ۳۲۰ هرتز روی رأس میله شبیه‌سازی می‌شود. لذا سرعت موج در میله با استفاده از رابطه‌ی جذر نسبت مدول الاستیسیته به جرم مخصوص برای میله‌های مختلف با انواع بتن محاسبه شده و در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): سرعت موج در میله از انواع بتن.

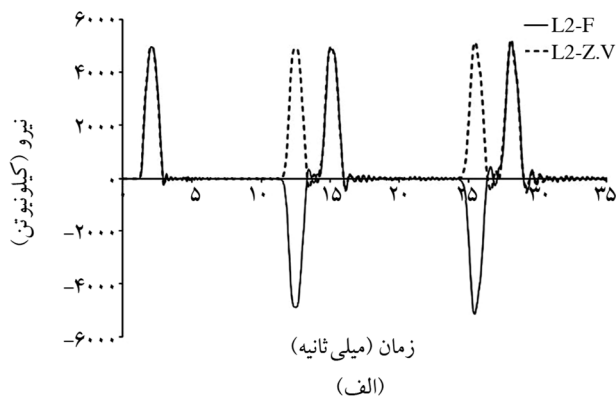
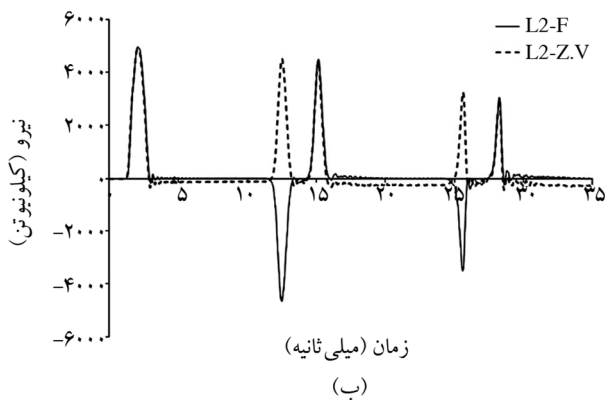
مشخصات مصالح	بتن معمولی	بتن سبک					
		S3	S2	S1	L3	L2	L1
سرعت موج (متر بر ثانیه)	۳۲۱۴	۳۰۶۶	۳۰۷۲	۳۲۷۱	۳۰۰۶	۳۳۴۲	۳۱۵۴



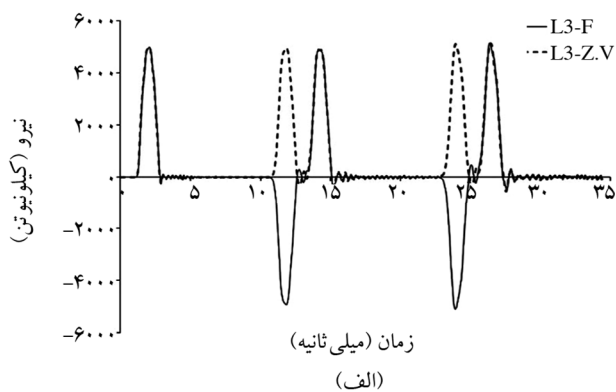
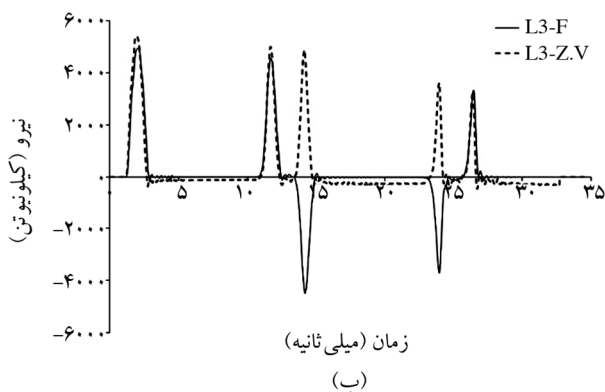
شکل (۲): پاسخ دینامیکی میله از بتن معمولی (CC) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



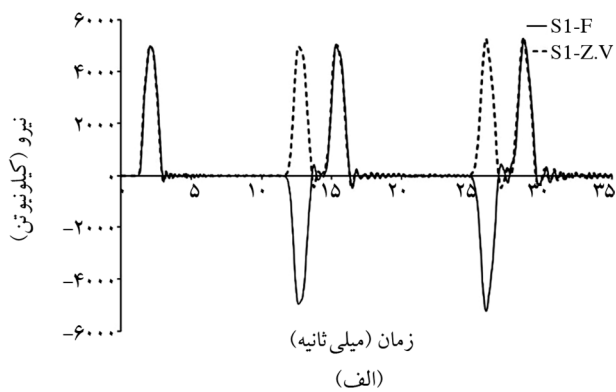
شکل (۳): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L1) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



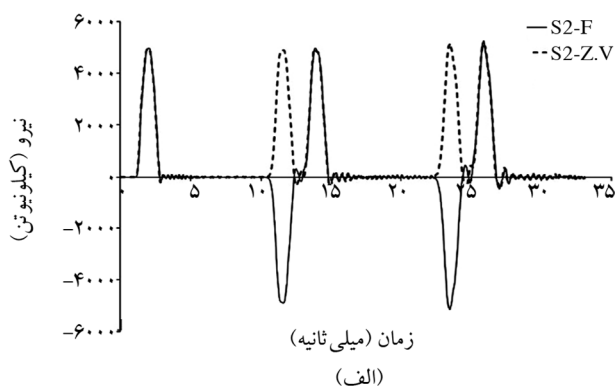
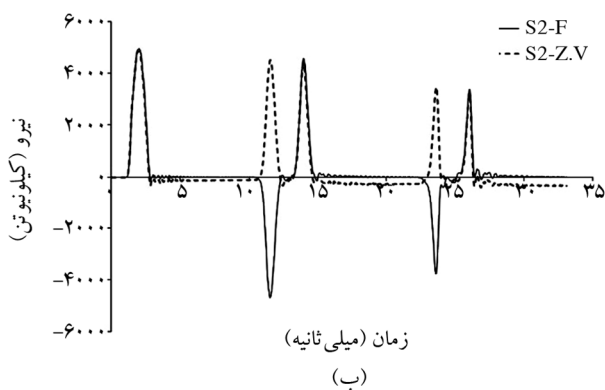
شکل (۴): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L2) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



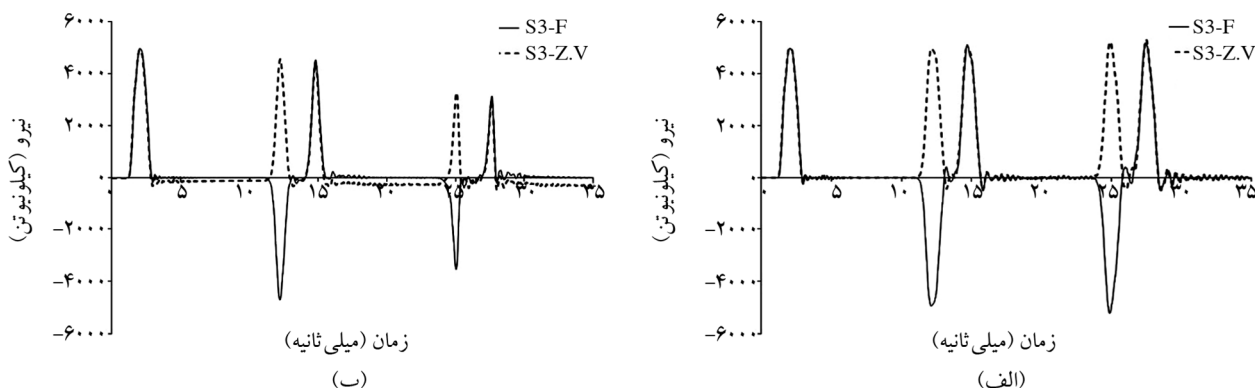
شکل (۵): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L3) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



شکل (۶): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S1) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



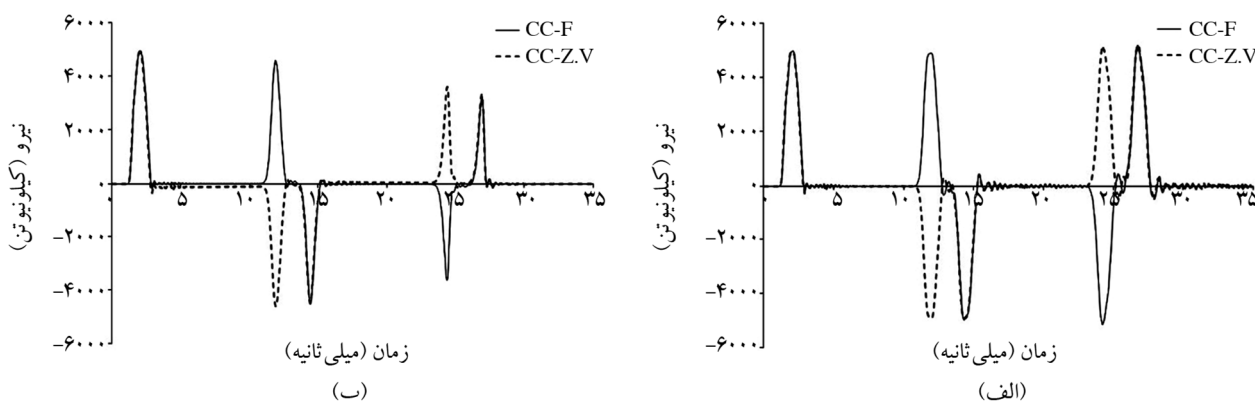
شکل (۷): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S2) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



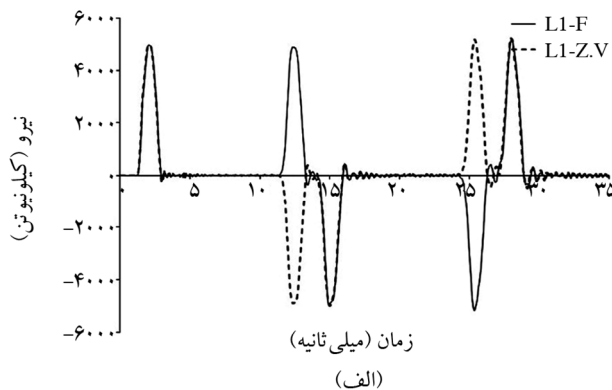
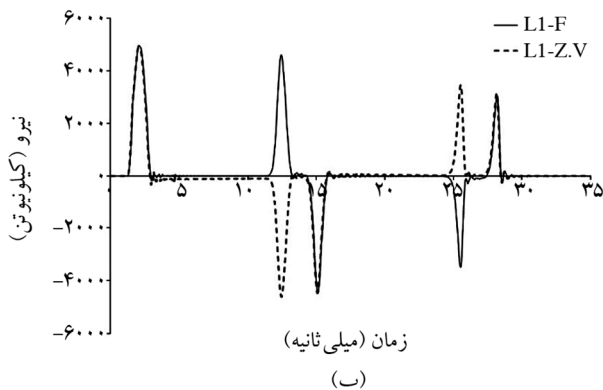
شکل (۸): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S3) با انتهای آزاد در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.

محاسبه شده و مطابق شکل‌های (۹) الی (۱۵) می‌باشند. در این حالت نیز مانند شرایط انتهایی آزاد میله، موج F ناگهان افزایش یافته و موج Z.V کاهش می‌یابد، ولی از نظر محتوایی با هم متفاوت هستند. وقتی که موج به انتهای میله می‌رسد، بسته به شرایط گیرداری آن نوع بازتاب موج نیز متفاوت است؛ به طوری که موج فشاری در میله با انتهای آزاد دوباره به صورت فشاری منعکس شده، در حالی که در میله با انتهای گیردار به صورت کششی منعکس می‌شود. همچنین مانند حالت قبل نیز، وجود میرایی باعث از بین رفتن امواج در طول زمان می‌شود. همان‌طور که گفته شد، خصوصیات مکانیکی انواع بتن با توجه به طرح اختلاط آن تأثیر مستقیمی در سرعت انتشار موج در آن داشته و این مسئله می‌تواند در رفتار شمع‌های کوبشی نیز تأثیرگذار باشد. در این قسمت، با مقایسه‌ی انتشار موج در میله از انواع بتن سبک با بتن معمولی، به مطالعه و بررسی تأثیر نوع بتن در رفتار آن پرداخته می‌شود.

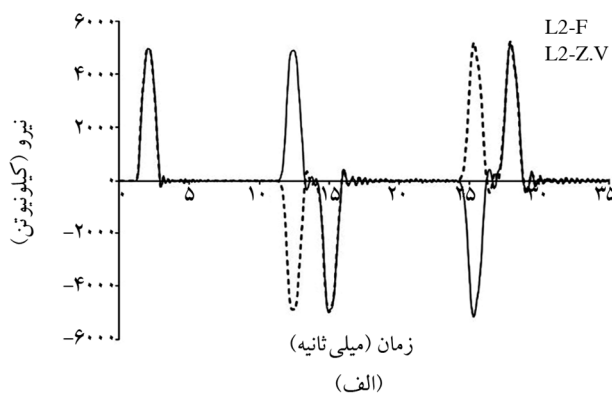
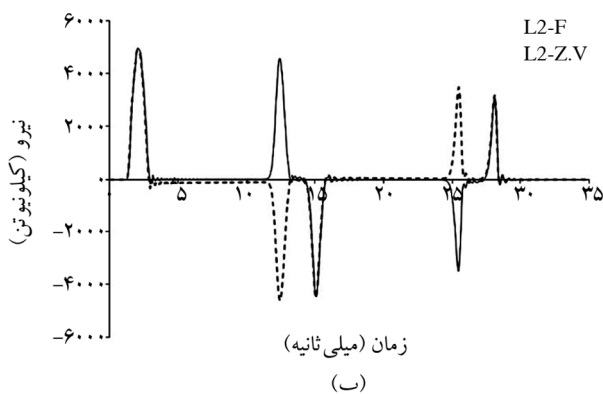
همان‌طور که در شکل‌های (۲-الف) الی (۸-الف) مشاهده می‌شود، بعد از زمان $2L/C$ که در حقیقت برابر زمان لازم برای حرکت موج از نقطه‌ی پنج متری پایین سر میله تا نوک و برگشت آن به نقطه‌ی مورد نظر می‌باشد، موج F ناگهان افزایش یافته و موج Z.V کاهش می‌یابد، به طوری که دامنه‌ی هر دو موج برابر ضریبی از دامنه‌ی موج منتشر شده می‌باشد. این مسئله در میله بدون میرایی با آنچه در تئوری انتشار یک‌بعدی موج مشاهده می‌شود، به‌طور دقیق مطابقت دارد. همچنین کاهش هر دو موج F و Z.V بعد از عکس‌العمل نوک، ناشی از شرایط تکیه‌گاهی و انتهای آزاد میله است. همچنین در شکل‌های (۲-ب) الی (۸-ب) نتایج مشابهی با در نظر گرفتن میرایی یک درصد برای میله مشاهده می‌شود؛ با این تفاوت که با گذشت زمان موج مستهلک شده و در نتیجه موج‌های F و Z.V نیز مستهلک می‌شوند. نتایج انتشار موج در حالتی که انتهای میله گیردار در نظر گرفته می‌شود، تحت ضربه‌ی یکسان



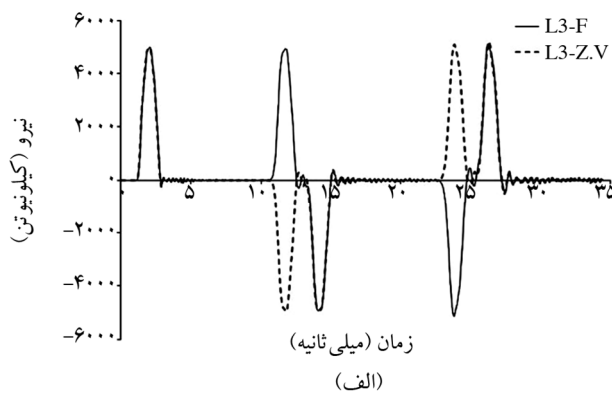
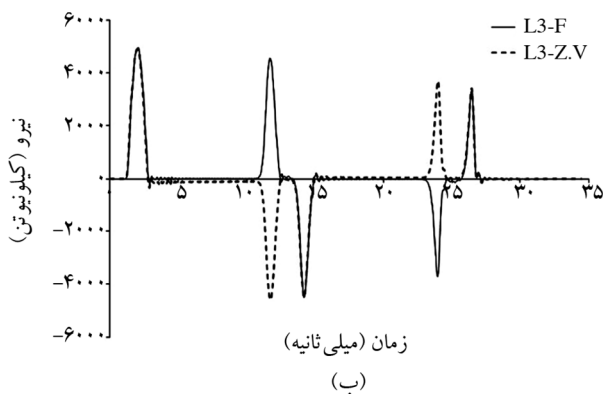
شکل (۹): پاسخ دینامیکی میله از بتن معمولی (CC) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



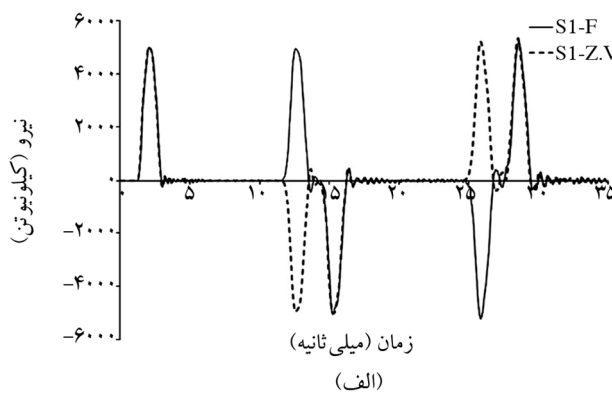
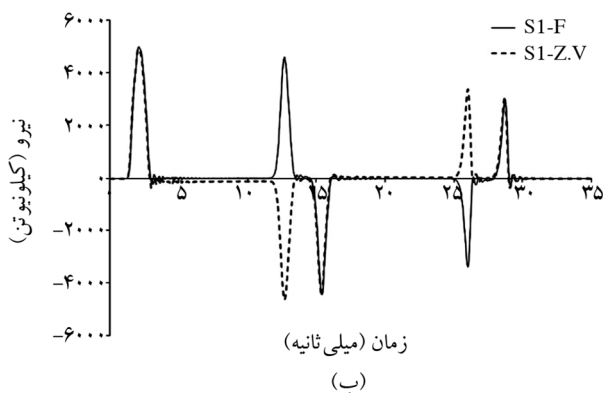
شکل (۱۰): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L1) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



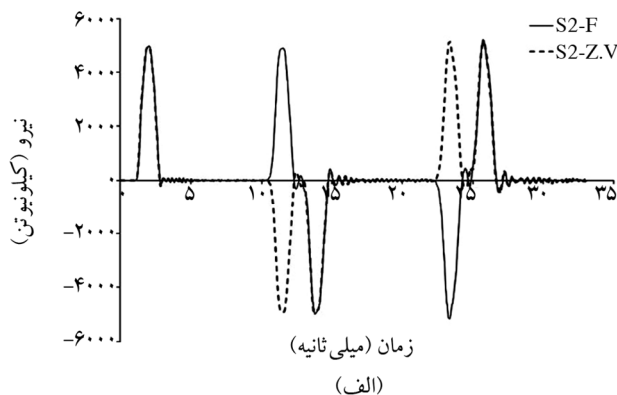
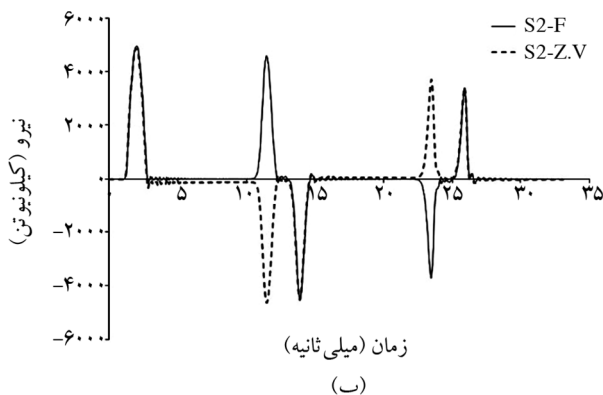
شکل (۱۱): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L2) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



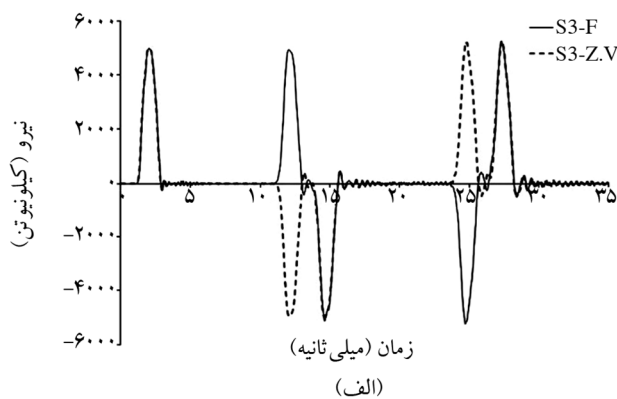
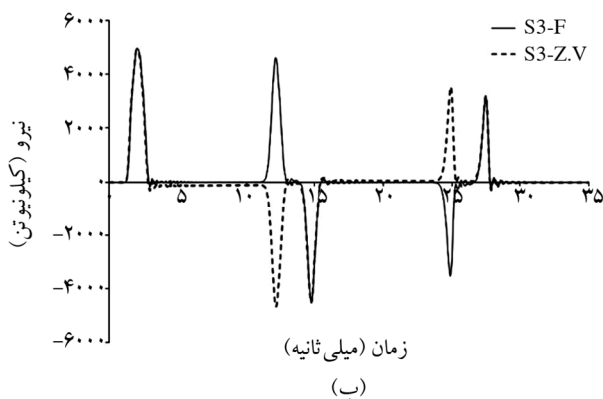
شکل (۱۲): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L3) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



شکل (۱۳): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S1) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



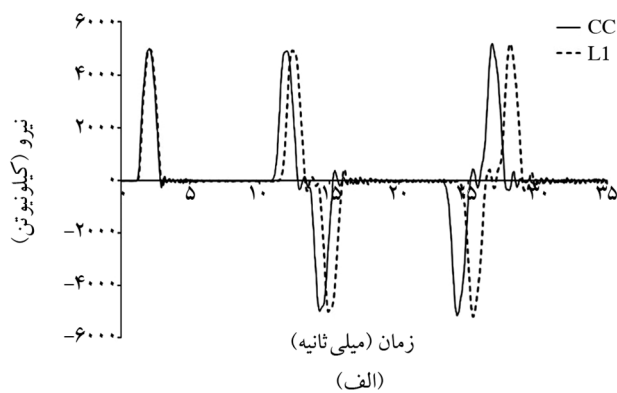
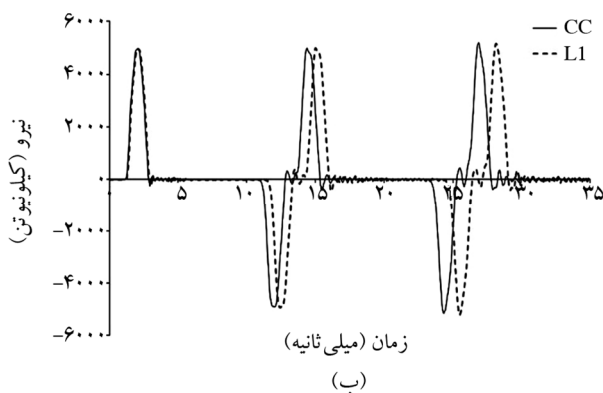
شکل (۱۴): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S2) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.



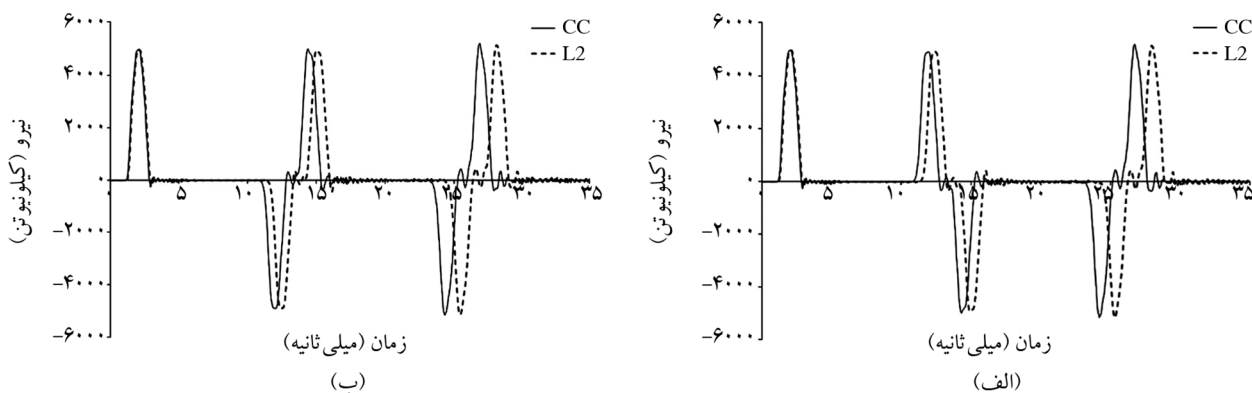
شکل (۱۵): پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S3) با انتهای گیردار در حالت‌های (الف) بدون میرایی و (ب) با میرایی.

رفت و برگشت موج، می‌تواند رفتار بسزایی نسبت به بتن معمولی داشته باشد. در اینجا می‌توان این‌طور استنتاج نمود که به دلیل این مسئله، شمع‌های ساخته شده از بتن سبک L3 و S2 می‌توانند دارای رفتار بهتری در فرآیند کوبش نسبت به سایر شمع‌ها داشته باشند که این موضوع در بخش بعد با تحلیل و مقایسه‌ی رفتار این شمع‌ها در فرآیند کوبش، به‌طور دقیق مورد ارزیابی قرار داده می‌شود.

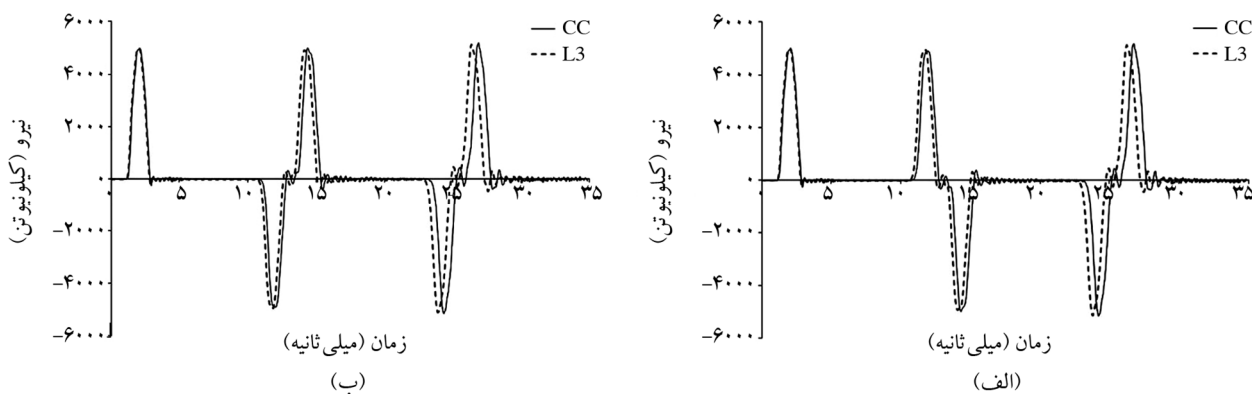
مطابق جدول (۳)، سرعت انتشار موج در میله‌های از بتن سبک L3 و S2 بیشتر از میله با بتن معمولی بوده و در بقیه نیز این سرعت کمتر یا مساوی است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۶) الی (۲۱) نیز دیده می‌شود، در زمانی معادل $2L/C$ ، پاسخ دینامیکی میله‌های از بتن سبک L3 و S2 با یکسان بودن دامنه‌ی آن، به علت سرعت بالاتر موج در زمان زودتری نسبت به میله از بتن معمولی دیده می‌شود و در حقیقت این کاهش زمان



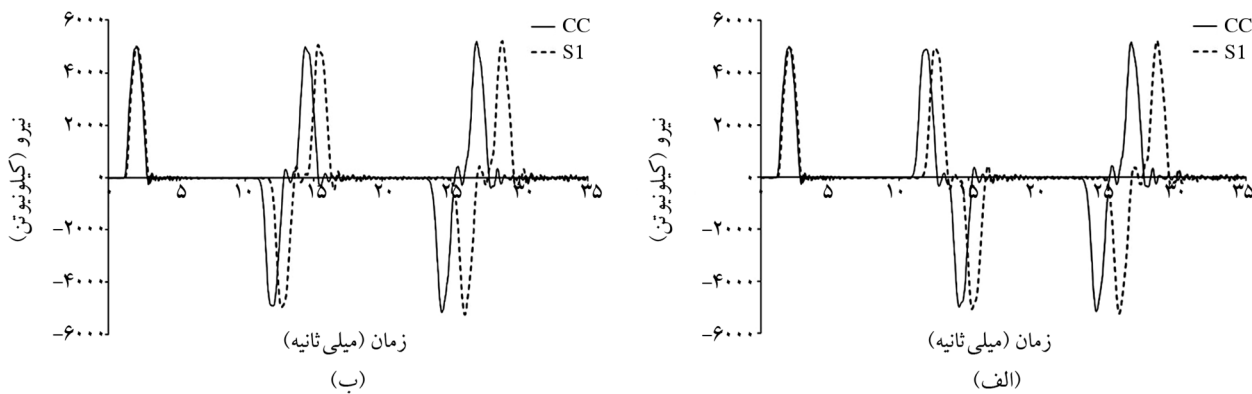
شکل (۱۶): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L1) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



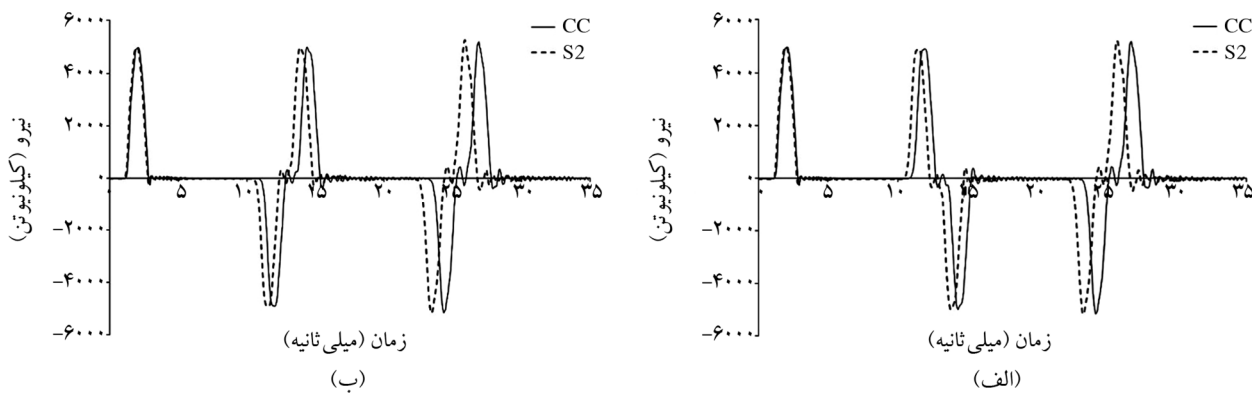
شکل (۱۷): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L2) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



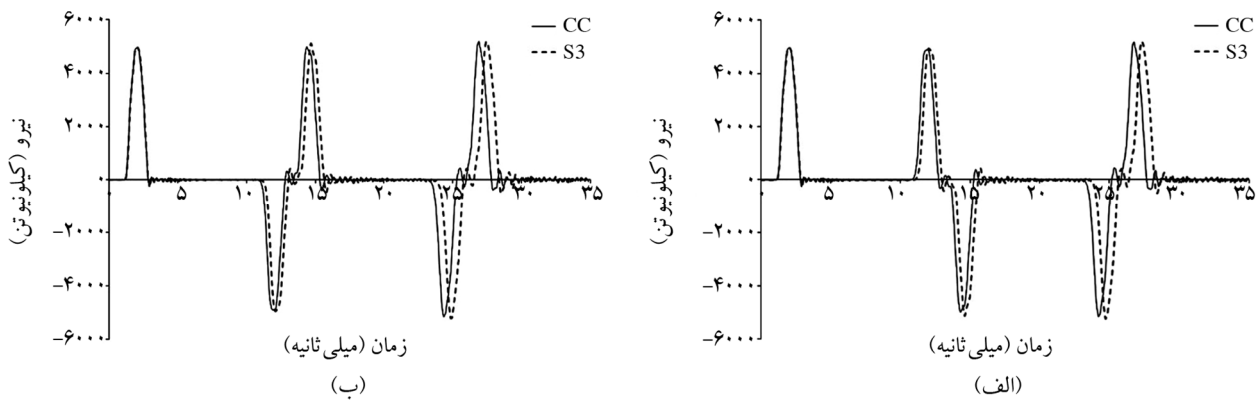
شکل (۱۸): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (L3) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



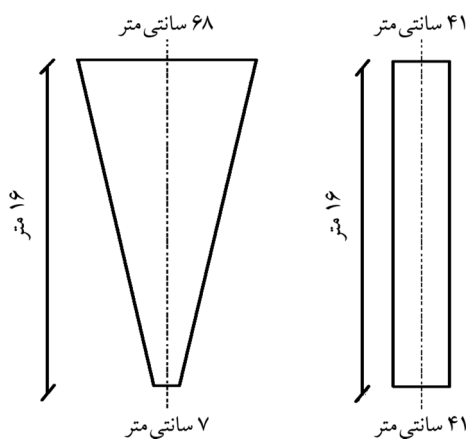
شکل (۱۹): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S1) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



شکل (۲۰): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S2) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



شکل (۲۱): مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی میله از بتن سبک (S3) با بتن معمولی (CC) در حالت‌های (الف) با انتهای گیردار و (ب) با انتهای آزاد.



شکل (۲۲): شمع‌های بتنی سبک با هندسه‌ی استوانه‌ای و مخروطی.

می‌شود که این شمع‌ها با استفاده از بتن معمولی و بتن سبک ساخته شده و خصوصیات مکانیکی آنها مطابق جدول (۲) است. برای تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار، اندازه‌ی شبکه‌ی المان‌ها بایستی به درستی انتخاب شود تا نتایج صحیحی به دست آید، لذا در اطراف جداره‌ی شمع و نوک شمع، اندازه‌ی المان‌ها به صورت ریز در نظر گرفته شده و هر چه به سمت مرزهای محیطی پیش رفته است، اندازه‌ی المان‌ها بزرگ‌تر لحاظ شده‌اند. شکل (۲۳) سیستم مدل‌سازی سه‌بعدی خاک و شمع را نمایش می‌دهد.

پس از به وجود آوردن هندسه‌ی مدل، مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک و مدل رفتاری الاستیک برای شمع به منظور تعریف مشخصات رفتاری و مقاومتی مصالح خاک و شمع اختصاص داده می‌شود. از آنجایی که به دست آوردن پارامترهای خاک کاری پیچیده و همراه با خطای زیادی است، لذا تعیین این مشخصات در پروژه‌های مختلف از مراحل اساسی کار می‌باشد.

۳- بررسی و تحلیل کوبش شمع‌های پیش‌ساخته از بتن سبک با مقاطع متغیر

قضاوی و توسلی [۱۵] با مدل‌سازی شمع و خاک به کمک روش تفاضل محدود، به تحلیل رفتار شمع‌های توپر از بتن معمولی با مقاطع متغیر تحت کوبش پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان با بررسی رفتار شمع‌های استوانه‌ای در مقایسه با رفتار شمع‌های غیر استوانه‌ای هم حجم معادل آن تحت کوبش، نشان می‌دهد که هر چه زاویه‌ی جداره‌ی شمع افزایش یابد، سرعت و نشست نهایی شمع نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه‌ی جداره‌ی شمع، مدت زمان بیشتری طول کشیده تا سرعت کاهش یابد. همچنین میزان نشست نهایی و سرعت با توجه به تغییر هندسه‌ی مقطع شمع متفاوت است، به طوری که نشست شمع در شمع استوانه‌ای از همه کمتر و جابه‌جایی شمع با مقطع کاملاً مخروطی از همه بیشتر است و شمع‌های دارای مقطع ترکیبی استوانه‌ای-مخروطی در بین این دو مقدار قرار دارند.

در این بخش، به مطالعه و تحلیل کوبش شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده از انواع بتن سبک و مقایسه‌ی رفتار آنها با شمع‌های بتنی معمولی پرداخته می‌شود. بدین منظور دو شمع استوانه‌ای و مخروطی هم حجم مطابق شکل (۲۲)، در نظر گرفته شده که ارتفاع آنها برابر ۱۶ متر بوده و تمام طول آن به صورت مدفون در خاک است. شمع C، شمع با مقطع استوانه‌ای به قطر ۴۱ سانتی‌متر و شمع T، شمع مخروطی کامل که دارای قطر سر ۶۸ سانتی‌متر و قطر نوک ۷ سانتی‌متر می‌باشد. در این تحلیل‌ها فرض

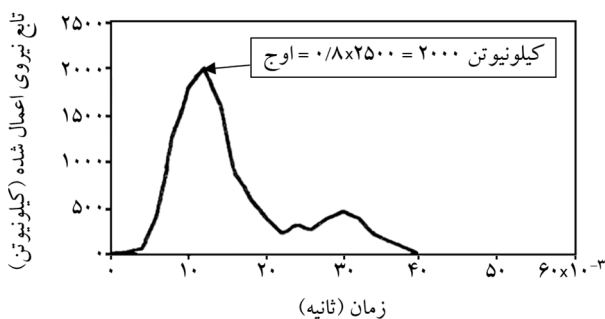
در محل سطح تماس شمع و خاک، المان‌های اندرکنش در جداره و نوک شمع در نظر گرفته شده است. این عمل موجب شده که این المان‌ها به یکی از این دو سطح چسبیده و سطح دیگر با یک فاصله نسبت به سطح دیگر تولید شود. پارامترهای مؤثر المان‌های اندرکنش شمع و خاک به شرح جدول (۵) در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): مشخصات المان‌های اندرکنش شمع و خاک مورد استفاده شده.

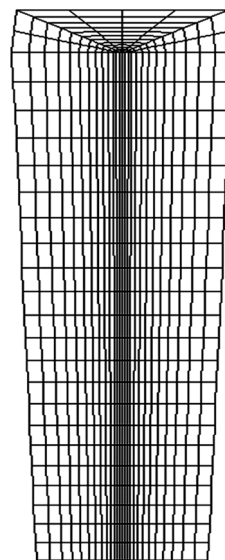
پارامترهای تغییرشکلی (کیلو نیوتن / متر ^۲)		پارامترهای مقاومتی		المان حد واسط
سختی برشی	سختی نرمال	چسبندگی (کیلو نیوتن / متر ^۲)	زاویه اصطکاک داخلی	
۰/۵C	۰/۵C	۲Z	۶°	

جهت انجام تحلیل دینامیکی فرآیند کوبش در اثر ضربه، لازم است شرایط مرزی دینامیکی مناسب برای جذب امواج در جداره‌ها و جلوگیری از انعکاس آنها به داخل محیط، در جداره‌ها و کف اعمال گردد، بدین صورت که در این مرزها، از میراگرهای مستقل که در جهات برشی و نرمال در مرزهای مدل لحاظ شده، استفاده می‌شود. بارگذاری دینامیکی معادل ضربه نیز به صورت تاریخچه‌ی تنش مطابق شکل (۲۴) بر سر شمع وارد شده و به منظور ثبت نتایج، نقاطی در سر، وسط، نوک و جداره‌ی شمع و همچنین در خاک تعریف شده است.

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی، مقادیر نفوذ و سرعت شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده از بتن سبک با مشخصات L1، L2 و L3 و همچنین S1، S2 و S3 که تحت ضربه‌ی چکش قرار می‌گیرند، به صورت مجزا محاسبه و با یکدیگر مقایسه و نتایج آن در شکل‌های (۲۵) تا (۳۲) آورده شده است.



شکل (۲۴): تابع نیروی اعمال شده بر سر شمع [۱۷، ۱۵].



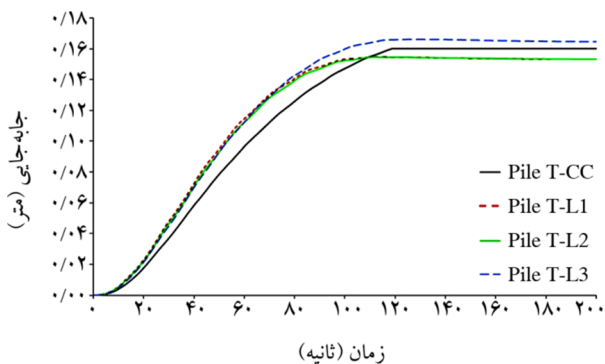
شکل (۲۳): مدل سازی سه بعدی خاک و شمع.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، در این پژوهش پارامترهای خاک مطابق مشخصات ارائه شده در پژوهش قضاوی و توسلی [۱۵] به مدل اختصاص داده شده است.

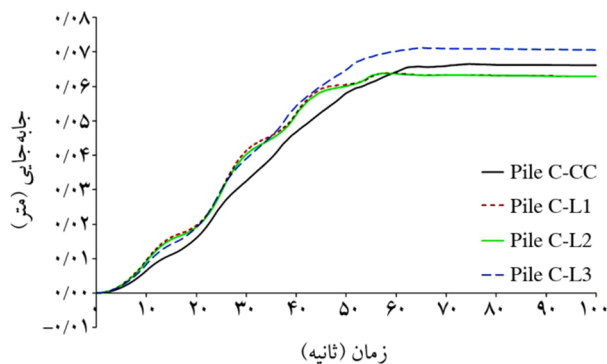
سطح تراز آب در روی خاک فرض شده، بنابراین محیط حالت کاملاً اشباع دارد. به منظور بررسی جابه‌جایی و تغییر مکان‌های شمع و خاک، جداره‌های محیط در مرزها مدل حالت غلنگی داشته و از نظر جابه‌جایی در راستای بردار نرمال سطح جداره محدود می‌باشند. کف محیط نیز کاملاً گیردار بوده و اجازه‌ی تغییر مکان و جابه‌جایی در هیچ راستایی را ندارد. ابعاد محیط خاک در مدل معادل ۲۰ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است. لذا شرایط مرزی واقعی در جداره‌های محیط اعمال می‌شود، زیرا فاصله‌ی این مرزها باید به گونه‌ای باشد که تأثیری در تنش‌ها و کرنش‌ها نداشته باشد.

جدول (۴): مشخصات مکانیکی خاک.

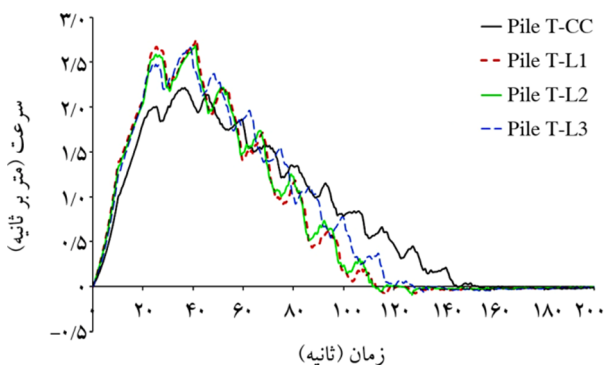
خاک	خصوصیات مکانیکی
موهر - کولمب	مدل رفتاری
۱۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۰/۳۵	ضریب پواسون
۲Z	چسبندگی خاک (کیلو پاسکال)
۰	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)
۶	میرایی (درصد)



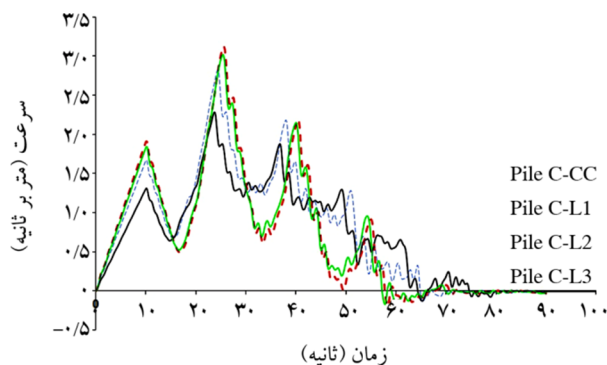
شکل (۲۹): مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی شمع مخروطی از بتن سبک تیپ L با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



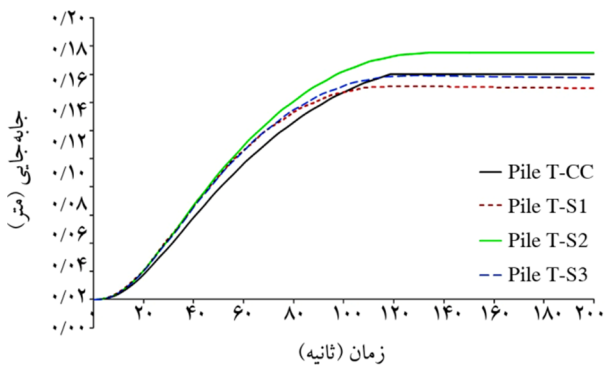
شکل (۲۵): مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی شمع استوانه‌ای از بتن سبک تیپ L با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



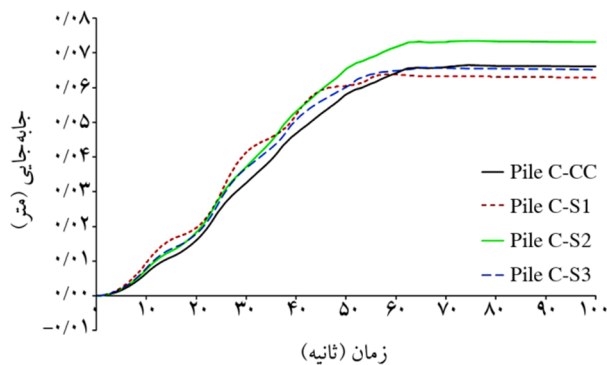
شکل (۳۰): مقایسه‌ی نمودار سرعت شمع مخروطی از بتن سبک تیپ L با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



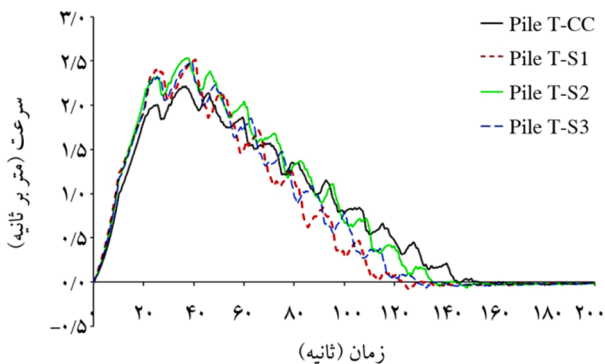
شکل (۲۶): مقایسه‌ی نمودار سرعت شمع استوانه‌ای از بتن سبک تیپ L با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



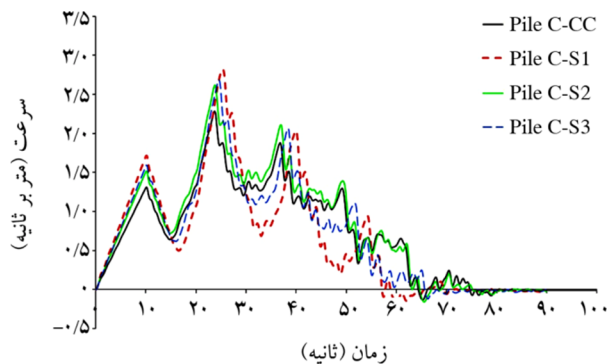
شکل (۳۱): مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی شمع مخروطی از بتن سبک تیپ S با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



شکل (۲۷): مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی شمع استوانه‌ای از بتن سبک تیپ S با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



شکل (۳۲): مقایسه‌ی نمودار سرعت شمع مخروطی از بتن سبک تیپ S با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.



شکل (۲۸): مقایسه‌ی نمودار سرعت شمع استوانه‌ای از بتن سبک تیپ S با بتن معمولی در زمان‌های مختلف.

جدول (۶): مقادیر نفوذ نهایی کوبش شمع‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی سبک و معمولی حاصل از FLAC3D.

S3	S2	S1	L3	L2	L1	CC	جابه‌جایی (میلی‌متر)
۶۵/۸۰	۷۳/۴۸	۶۰/۹۴	۷۱/۲۶	۶۳/۷۹	۶۳/۸۸	۶۶/۴۸	شمع C
۱۵۹/۰۰	۱۷۵/۳۰	۱۵۱/۶۰	۱۶۶/۰۰	۱۵۴/۰۷	۱۵۴/۸۰	۱۶۰/۱۰	شمع T

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به استفاده‌ی گسترده از شالوده‌های عمیق در سازه‌های مختلف، دانش فنی و روش‌های اجرایی و نیز طراحی این نوع شمع‌ها، نیازمند مطالعه بسیار و نوآوری می‌باشد. در این مقاله، به بررسی و تحلیل رفتار کوبشی شمع‌های پیش‌ساخته از انواع بتن سبک دارای مقاطع استوانه‌ای و مخروطی پرداخته شد که این مسئله موجب شناخت بیشتر این فرآیند و در نتیجه افزایش راندمان عملیات کوبش شمع‌ها می‌شود. از جمله روش‌های بررسی مسائل کوبش، استفاده از تئوری معادله‌ی موج و روش‌های عددی از قبیل روش اجزاء محدود و روش تفاضل محدود می‌باشد، به گونه‌ای که بتوان به شکلی منطقی رفتار شمع و خاک را در هنگام کوبش شمع مدل‌سازی نموده و از اطلاعات و نتایج حاصل از آن در مراحل مختلف طراحی و اجرای شمع‌ها استفاده نمود.

در این پژوهش، ابتدا یک میله‌ی الاستیک با مشخصات مکانیکی بتن‌های مختلف مدل‌سازی گردیده و انتشار موج در آن در اثر اعمال بار ضربه به رأس میله بررسی شد. سپس با مدل‌سازی شمع مخروطی و تخصیص مشخصات مکانیکی انواع بتن سبک به آن، رفتار این گونه شمع‌ها نیز تحت کوبش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با مقایسه‌ی رفتار شمع‌های مختلف تحت کوبش و نمودارها و شکل‌های به‌دست آمده، نتایج به شرح زیر حاصل می‌شود:

با بررسی و تحلیل انجام شده بر روی انتشار موج در یک میله‌ی الاستیک از بتن سبک با انتهای گیردار و آزاد که تحت تأثیر ضربه قرار گرفته است، نتیجه می‌شود که سرعت انتشار موج در میله‌های ساخته شده از بتن سبک L3 و S2 بیشتر از میله‌ی با بتن معمولی بوده و در بقیه نیز این سرعت کمتر یا مساوی می‌باشد. همچنین در زمانی معادل $2L/C$ ، پاسخ دینامیکی

با مقایسه‌ی شکل‌های (۲۵) الی (۳۲) برای بتن سبک تیپ‌های L و S، نتیجه می‌شود که در اینجا نیز مقادیر نفوذ نهایی و سرعت شمع مخروطی ساخته شده از بتن سبک بیشتر از شمع استوانه‌ای است، که این مسئله مرتبط با میزان کاهش سختی نرمال و برشی المان حد واسط خاک و شمع به علت تغییر هندسه آن بوده و باعث افزایش میزان این جابه‌جایی می‌شود. همچنین ارتعاشات در شمع استوانه‌ای در زمان کوتاه‌تری از بتن رفته و در نتیجه در مدت زمان کمتری سرعت به صفر می‌گراید. در حالی که هرچه شکل شمع به سمت مقطع مخروطی متمایل شود، میزان استهلاک امواج کاهش یافته و در نتیجه شمع در مدت زمان بیشتری در نوسان بوده و میزان سرعت و نفوذ آن بیشتر می‌باشد. نتایج میزان نفوذ نهایی شمع‌های ساخته شده از بتن سبک در جدول (۶) آورده شده است.

نکته‌ی حائز اهمیت در مقایسه‌ی نمودارها، رفتار تقریباً مشابه شمع‌های کوبشی ساخته شده از بتن سبک در مقایسه با شمع‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی معمولی بوده و با استفاده از طرح اختلاط بهینه در ساخت شمع بتنی سبک، حتی می‌توان رفتار بهینه‌تری در فرآیند کوبش این شمع‌ها مشاهده نمود. در بخش ۲ استنباط شد که شمع‌های ساخته شده از بتن سبک L3 و S2 به دلیل بالا بودن سرعت انتشار موج در آنها، می‌توانند دارای رفتار بهتری در فرآیند کوبش نسبت به سایر شمع‌ها داشته باشند. با مقایسه‌ی نمودارهای جابه‌جایی و سرعت در شکل‌های (۲۵) الی (۳۲) برای انواع شمع‌های بتنی سبک، مشاهده می‌شود که شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده از بتن سبک L3 و S2، دارای جابه‌جایی و سرعت بیشتری نسبت به سایر شمع‌ها داشته، لذا استفاده از بتن سبک در شمع‌های کوبیدنی می‌تواند باعث افزایش راندمان شمع کوبی شود.

5. Wasserman, R. and Bentur, A. (1997) Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes. *Cem. Concr. Res.*, **27**(4), 525-537.
6. Khanzadi, M. and Chalekaee, A. (2013) Property improvement of Iranian LWAC: investigation of mechanical properties and stress-strain curve. *Modares Civil Engineering Journal*, **12**(4), 79-89 (in Persian).
7. Smith, E.A.L. (1960) Pile driving analysis by the wave equation. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, **86**(4), 35-61.
8. Chow, Y.K. (1981) *Dynamic Behaviour of Piles*. Ph.D. Thesis, University of Manchester, U.K.
9. Smith, L.M. and Chow, Y.K. (1982) Three-dimensional analysis of pile drivability. *2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Austin, Texas, 1-20.
10. Chow, Y.K. and Smith, L.M. (1984) A numerical model for the analysis of pile drivability. *2nd International Conference on the Application of Stress Waves to Piles*, Sweden, 319-325.
11. Uzag, O.G. (1988) *An Experimental and Numerical Study of Impact Driving of Open-Ended Pipe Piles in Dense Saturated Sand*. Ph.D. Thesis, University of Houston, Houston, Texas.
12. Mabsout, M.E. and Tassoulas, J.L. (1994) A finite element model for the simulation of pile driving. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **1**(37), 257-278.
13. Mabsout, M.E., Reese, L.C., and Tassoulas, J.L. (1995) Study of pile driving by finite element method. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(7), 535-543.
14. Sakr, M., El Naggat, M.H., and Nehdi, M. (2007) Wave equation analyses of tapered FRP-concrete piles in dense sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, 168-188.

میله‌های تیپ L3 و S2 با یکسان بودن دامنه‌ی آن، به علت سرعت بالاتر موج در زمان زودتری نسبت به میله از بتن معمولی دیده می‌شود و در حقیقت این کاهش زمان رفت و برگشت موج، می‌تواند رفتار مؤثری نسبت به بتن معمولی داشته باشد.

پس از شبیه‌سازی و بررسی رفتار شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی پیش‌ساخته از انواع بتن سبک و مقایسه‌ی رفتار آنها با یکدیگر و شمع پیش‌ساخته از بتن معمولی، استنباط می‌شود که شمع‌های بتنی سبک دارای رفتار تقریباً یکسان و مشابهی مانند بتن‌های معمولی دارند و حتی با انتخاب طرح اختلاط مناسب برای بتن سبک، عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی در کوبش دارند. این مسئله علاوه بر کاهش وزن شمع‌های بتنی پیش‌ساخته، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی شمع‌کوبی گردیده و همچنین با انتخاب طرح اختلاط مناسب و بیشتر شدن میزان نفوذ نهایی، افزایش راندمان شمع‌کوبی حاصل می‌شود.

با مقایسه‌ی رفتار شمع‌های استوانه‌ای و مخروطی پیش‌ساخته از بتن سبک، مشاهده می‌شود که نفوذ نهایی و سرعت کوبش در شمع استوانه‌ای کمتر از شمع مخروطی بوده و در نتیجه شمع مخروطی شکل عملکرد مناسب‌تری در فرآیند کوبش دارد.

مراجع

1. Tadayon, M. (2003) *Evaluation of Tensile Strength, Elastic Modulus, Poisson's Ratio and Corrosion in High Resistance of LWC with Materials in Iran*. Ph.D. Thesis, Iran University of Science & Technology, Iran (in Persian).
2. Ramezaniapour, A. (2012) *LWC: from research to application*, 1st National Conference on LWC, Tehran, Iran (in Persian).
3. Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E., and Ozcan, F. (2003) High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1595-1599.
4. Zhang, M.H. and Gjorv, O.E. (1991) Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. *ACI Mater. J.*, 150-158.

15. Ghazavi, M. and Tavasoli, O. (2012) Characteristics of non-uniform cross-section piles in drivability. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **43**, 287-299.
16. Tavasoli, O. and Ghazavi, M. (2016) Analysis of non-uniform cross section hollow piles in drivability. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **2**(4), 55-70 (in Persian).
17. Goble, G.G. and Rausche F. (1980) The analysis of pile driving. *2nd International Conference on the Application of Stress-Wave theory on Piles*, Stockholm, 4-5 June.

Wave Propagation Analysis and Behaviour of Precast Light-Weight Concrete Piles during Driving

Omid Tavasoli ^{1*} and Mahmoud Ghazavi²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
* Corresponding Author, email: o.tavasoli@iauet.ac.ir
2. Professor, Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

The pile driving process can be easily modeled prior to installation to determine adequate and appropriate equipment selection. Pre-casted lightweight concrete (LWC) provide an attractive alternative to conventional pile materials such as steel and common concrete by improving the durability of deep foundations. In this paper, the drivability of cylindrical and tapered piles with lightweight concrete was investigated and compared with traditional pile materials using the finite difference analysis. The three-dimensional model was considered to simulate pile-soil system in drivability by FLAC3D. The vertical LWC pile was assumed to behave linear elastic, and the soil was acted in elasto-plastic material obeyed the Mohr-Coulomb failure criterion. Interface elements were also used at the soil-pile contact surfaces along the pile shaft and toe to allow the slip occur during the driving procedure. Quiet boundaries were considered to prevent waves traveling in the lateral and vertical directions for the soil. The different concrete mixtures with Leca and Scoria were assumed to compare the size of the physical properties of light aggregate, which letters S and L represent Leca and the Scoria in each concrete mix design.

The analysis of wave propagation in LWC rods without and with damping effects were performed with fixed and free end boundary conditions. The rod gravity was neglected with no soil or other supports around the rod shaft. A half-sine stress wave was applied on the rod head. To represent the dynamic responses, the force and velocity records were monitored below the rod head to prevent the mixing up the upward stress wave and downward reflection from the rod head. The obtained results were exactly in accordance with one dimensional wave propagation theory in rods. The immediate F and Z.v waves shifted down after tip reflections are the reflections from the rod free head boundary condition. In fact, the downward initial compressive wave is reflected as compression type at rod fixed-end and reflected tension type at the rod free-top boundary conditions. The F wave and Z.v wave amplitudes were attenuated with time as expected due to the damping presence in the rod.

The pile drivability with light weight concrete and cylindrical and tapered geometry was also investigated in clayey soil and the results were compared. Based on signal matching for LWC piles, as expected, residual displacements of pile S2 and L3 are 8 to 20% greater than common concrete piles, and pile S3 has approximately the same behaviour as pile CC.

The analyses results indicate that LWS piles with selecting the appropriate mixture design and ratio between elastic modulus and specific weight have a better performance compared with common used concrete and therefore, it can affect the pile optimum penetration and economic saving of pile driving procedure.

Keywords: Lightweight Concrete; Pile Driving; Wave Propagation; Tapered Pile; Finite Difference Method.