بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران – گرایش مکانیک خاک و پی

عنوان پایان نامه (فارسی و انگلیسی)

مطالعات پارامتری و آزمایشات در محل برای بسط یک فرمول بهینه کوبش شمع

(Parametric studies and field testing for the development of an improved pile driving formula)

استاد / اساتید راهنما

دکتر قاسم زاده

استاد مشاور

Dr. Julian Seidel

نام دانشجو: هادی احمدیان

شماره دانشجویی: ۸۶۰۲۹۰۴

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هییت داوران، نسخه نهایی پایان نامه آقای:

را با عنوان:

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می‌کند.

اعضای هییت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ - استاد راهنما			
۲ - استاد مشاور			
۳ - استاد مشاور			
٤ - استاد ممتحن			
٥ - استاد ممتحن			
٦ - نماینده گروه			

از آمدنم نبود گردون را سود | وز رفتن من جاه و جلالش نفزود
وز هیچ کسی نیز دو گوشم نشنود | کین آمدن و رفتنم از بهر چه بود

حیرت و احتیاج دو انگیختار علم و فن هستند که بنیان‌های عمده دانش بشری را بر دوش دارنـد. انسانِ ناتوان، درمانده و حیرت‌زده از آن زمان که سر برآورد و خود را در حلقهٔ نیروهای توفنـده‌ای یافت که هر آن می‌رفتند تا طومار حیاتش را در هم بپیچند، دریافت که ادامهٔ حیاتش جز به وسیله دریافتن حقیقت جهان و نیز ابزارهایی که بتوانند این حقایق را به خدمت گیرند امکان‌پذیر نیست، پس قدم در این راه نهاد. ماهیت تجمعی دانش بشری به او امکان داد تا بر شانهٔ پیشینیانش بایستد و اندک اندک افق‌های فراتر را ببیند، در پس تمام این پشتکار فرا روایتـی بـود کـه جریـان دانـش بشری را هدایت می‌کرد. اما انباشته شدن دانش‌ها آرام آرام سنت‌هایی پدید آورد که در بلند مدت دیوارهایی درپیش روی دیدگان بشری برآوردند که افق‌هایی کاذب را نوید می‌دادند. ماهیـت نظـام ساز بشری در پی به نظم کشیدن جهان در هم افتاده‌ای است که سخت تن به نظم می‌سپرد، تمام تاریخ علم را می‌توان به این جدال و تلاش برای جای دادن جهان عاصی در قالب نظام‌هـای مـدون قابل درک، تعبیر کرد. تلاش بشر بر استواری دانشش بر اصول موضوعه و متعارفه که پای بر صخره یقین دارند منجر به خلق منظومه دانش بشری گشته اسـت .و همـراه بـا ایـن بنیـان‌هـا نهادهـا و ساختارهایی شکل گرفته که تدریس علم موجود و فراهم آوردن تداوم جریان پیشرفت بشری را بر عهده دارند.

اما ماهیت پارادوکسیکال هر بنیان پایدار در یقین در برخورد با بحـث تجـدد و پرهیـز از انحـراف زمینه‌ای مناسب برای به بیراهه رفتن این زیر ساخت‌های سخت و نرم دانـش بـوده‌انـد . اگـر چـه دغدغه یقین که امری مشروع در هر پژوهش بشری است، تا حد زیادی زیر سـاخت‌هـای نـرم را از تهمت پنهان شدن در نقاب علم برای برآوردن غایاتی غیر انسانی تبرئه می‌کند اما در بـاب نهادهـا سخن از لونی دیگر خواهد بود. کم نیستند اندیشه‌هـای والا و ایـده‌هـای برتـری کـه در لابـه لای هزارتوهای دروغین تدوین و نظم‌دهی گم می‌شوند و کم نیستند مراکز دانش‌پژوهی که تمام قـوت عمده افکار را در از هم واکردن گره های بیشمار روزمره ترین امور انسانی مستهلک می‌سازند.

این تحقیق اگر چه کوشیده که کیفیتش در پرتو این امور نازل نشود اما نگارنده را اعتقاد بـر ایـن است که این معضلات اگر نه به شکلی فراگیر که به شکلی قابل توجه در روند هر تحقیق علمـی و فنی در فضای جاری موجود است و ناخود آگاه بر کیفیت هر پژوهشی تاثیرگذار است.

قضاوت ابعاد این رویکردها ،تاثیر آن بر کیفیت پژوهش و نیز جدا کردن آن از کوتاهی‌هـای مولـف بر عهده خوانندگان است که خود بی‌شک درگیرودار این افت و خیزها بوده‌اند.

چکیده

یکی از روشهای اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع‌های کوبشی استفاده از فرمول‌های دینامیکی می‌باشد. تمامی این روابط بر اساس انرژی رسیده به شمع پایه‌ریزی شده‌اند و نیز این روابط فرض می‌کنند که انرژی رسیده به شمع برای کلیه شمع‌های کوبیده شده با یک چکش، ثابت می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از آنالیز معادله موج و داده‌های تجربی رابطه بین سرعت ضربه چکش و حداکثر سرعت حرکت سر شمع و نیز رابطه بین انرژی ضربه چکش و میزان انرژی وارد شده به شمع تخمین زده می‌شود و سپس مطالعات پارامتری برای تعیین اثر طول چکش، وزن چکش، سختی بالشتک شمع و چکش، وزن کلاهک، امپدانس شمع، طول شمع و مقاومت خاک بر روی سرعت نسبی و انتقال انرژی صورت می‌گیرد. در نهایت با توجه به داده‌های تجربی فرمول جدیدی برای تخمین ظرفیت باربری شمع با استفاده از اندازه‌گیری‌های سرعت و میزان فرورفت دایمی و تغییر مکان الاستیک ارایه می‌شود. در آخر به معرفی دستگاه PDM در زمینه اندازه گیری دقیق میزان فرو رفت شمع به ازای هر ضربه و نیز میزان تغییر شکل الاستیک سیستم پرداخته می‌شود و نیز به نحوه اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع با استفاده از این دستگاه و روابط بدست آمده در این مطالعه اشاره می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فرمول‌های دینامیکی، ظرفیت باربری، آزمایش دینامیکی، GRLWEAP، PDM

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ۶

فهرست جدول‌ها ۷

فهرست شکل‌ها ۸

فصل ۱- مقدمه ۲

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- فرمول‌های دینامیکی ۲

۱-۳- نیازها و اهداف تحقیق ۶

فصل ۲- مروری بر ادبیات موضوع ۸

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- چکش‌ها با احتراق داخلی ۹

۲-۳- چکش‌های با احتراق خارجی ۱۱

۲-۳-۱- انواع چکش‌های با احتراق خارجی ۱۲

۲-۳-۱-۱- چکش‌های هوا/بخار با عملکرد یک طرفه ۱۳

۲-۳-۱-۲- چکش‌های هوا/بخار با عملکرد دو طرفه ۱۳

۲-۳-۱-۳- چکش‌های هیدرولیک با عملکرد دو طرفه ۱۳

۲-۴- اهم پارامترهای مدل چکش با احتراق داخلی و خارجی ۱۴

۲-۵- چکش‌های ویبره ای ۱۶

۲-۵-۱- اهم پارامترهای مدل چکش ویبره‌ای ۱۷

۲-۶- انواع شمع‌ها ۱۹

۲-۶-۱- شمع‌های با تغییر مکان زیاد ۱۹

۲-۶-۱-۱- شمع‌های بتنی مسلح پیش ساخته ۱۹

۲-۶-۱-۲- شمع‌های بتنی پیش‌تنیده پیش‌ساخته ۱۹
۲-۶-۱-۳- شمع‌های لوله‌ای فولادی ته بسته ۲۰
۲-۶-۱-۴- شمع‌های بتنی درجاریز کوبشی ۲۰
۲-۶-۲- شمع‌های با تغییر مکان کم ۲۰
۲-۶-۲-۱- شمع‌های فولادی H شکل ۲۰
۲-۶-۲-۲- شمع‌های لوله‌ای فولادی ته باز ۲۰
۲-۶-۳- شمع‌های حفاری شده ۲۱
۲-۶-۳-۱- شمع‌های حفر ماشینی ۲۱
۲-۶-۳-۲- ریز شمع‌ها ۲۱
۲-۶-۳-۳- شمع‌های فرورونده در سنگ ۲۱
۲-۶-۳-۴- شمع‌های CFA ۲۲
۲-۶-۳-۵- شمع‌های حفاری شده با قطر زیاد ۲۲
۲-۶-۳-۶- barretteها ۲۳
۲-۶-۴- شمع‌های خاص ۲۳
۲-۶-۴-۱- شمع‌های ریختنی جداری و اتکایی ۲۳
۲-۶-۴-۲- شمع‌های کامپوزیت ۲۳
۲-۷- کلاهک شمع و انواع بالشتک شمع و چکش ۲۳
۲-۷-۱- بالشتک شمع ۲۴
۲-۷-۲- بالشتک چکش ۲۴
۲-۸- شرایط زمین ۲۵
۲-۹- اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع‌ها ۲۶
۲-۹-۱- فرمول‌های دینامیکی کوبش شمع ۲۷
۲-۹-۱-۱- فرم‌های اصلی انرژی ۳۲
۲-۹-۲- آزمایش استاتیکی شمع ۴۴

۲-۹-۳- آزمایش دینامیکی PDA و تحلیل انطباق سیگنال CAPWAP ۴۵
۲-۱۰- تخمین ظرفیت باربری، معیار توقف کوبش و انتخاب چکش قبل از کوبش شمع ۴۶
۲-۱۰-۱- فرمول‌های دینامیکی کوبش شمع ۴۶
۲-۱۰-۲- استفاده از برنامه GRLWEAP ۴۶
فصل ۳- روش‌های تحلیلی ۴۸
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- تخمین سرعت و انرژی با استفاده از فرمول‌های دینامیکی ۴۸
۳-۲-۱- برخورد الاستیک ۴۸
۳-۲-۲- برخورد غیر الاستیک: ۴۹
۳-۳- روش Fairhurst در تعیین حداکثر سرعت بعد از برخورد ۵۱
۳-۴- روش Fischer در تعیین حداکثر سرعت و انرژی ۵۳
۳-۵- مدل امپدانس ۵۵
۳-۶- صحت سنجی برنامه GRLWEAP ۵۶
۳-۶-۱- معرفی برنامه GRLWEAP ۵۷
۳-۶-۲- صحت سنجی GRLWEAP با نتایج تحلیلی ۵۸
فصل ۴- مطالعات پارامتری ۶۰
۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- اثر طول شمع ۶۰
۴-۲-۱- اثر طول شمع بر روی میزان انرژی رسیده به شمع ۶۰
۴-۲-۲- اثر طول شمع بر روی سرعت سر شمع ۶۳
۴-۳- اثر طول چکش ۶۴
۴-۳-۱- اثر طول چکش بر روی انرژی و سرعت ۶۴
۴-۴- اثر بالشتک چکش بر روی سرعت و انرژی ۶۶
۴-۵- اثر مقاومت جداره بر روی میزان انرژی و سرعت ۶۸

۴-۵-۱- اثر مقاومت بر روی انرژی ۶۸
۴-۵-۲- اثر مقاومت جداره بر روی سرعت ۶۹
۴-۶- اثر کلاهک بر روی انرژی ۷۰
۴-۷- نتیجه‌گیری ۷۲
فصل ۵- نتایج آزمایشات در محل و فرمول جدید دینامیکی ۷۴
۵-۱- مقدمه ۷۴
۵-۲- فرمول‌های دینامیکی ۷۴
۵-۲-۱- نقایص فرمول‌های دینامیکی ۷۴
۵-۲-۲- نقش اساسی فرمول‌های دینامیکی کوبش شمع ۷۵
۵-۲-۳- بهبود قابلیت اطمینان فرمول‌های دینامیکی ۷۵
۵-۳- قابلیت اطمینان نسبی روش انرژی و آنالیز CAPWAP ۷۹
۵-۴- پیاده‌سازی روش‌های فرمول انرژی در سایت ۸۰
۵-۴-۱- تغییرات انرژی چکش و نتایج آن ۸۲
۵-۵- گراف باربری ۸۷
۵-۶- محاسبه ظرفیت بر اساس انرژی اندازه‌گیری شده چکش ۸۹
۵-۷- محاسبه ظرفیت بر اساس انرژی استخراج شده از DMX ۹۰
۵-۸- محاسبه ظرفیت بر اساس انرژی استخراج شده از حداکثر سرعت سر شمع ۹۶
۵-۹- معرفی دستگاه PDM ۱۰۱
۵-۱۰- کاربردهای دستگاه PDM ۱۰۵
۵-۱۰-۱- تعیین ظرفیت باربری ۱۰۵
۵-۱۰-۲- طول و آسیب دیدگی شمع ۱۰۶
۵-۱۰-۳- نصب لرزه‌ای شمع‌ها ۱۱۰
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۳
۶-۱- پیمایش پیوسته ۱۱۵

۶-۲- پیشنهادات برای کارهای آتی..... ۱۱۷

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
امپدانس شمع	Z
مدول یانگ	E
سطح مقطع	A
سرعت موج	c
سرعت حرکت شمع	v
وزن چکش	W_r
ارتفاع سقوط	h
فرورفت دایمی شمع	s
فشردگی الاستیک	TC
ظرفیت باربری	R_u
بازدهی	e_h
ضریب بازگشت	e
سرعت چکش	v_h
نسبت امپدانس	α_h
سختی	k
حداکثر انرژی ثبت شده با PDA	EMX
حداکثر سرعت ثبت شده با PDA	VMX
فاکتور تصحیح سایت	λ_s
فاکتور تصحیح کلی	λ_g
حداکثر تغییرمکان شمع	DMX

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مشخصات بالشتک‌های چکش [۶] ۲۴
جدول ۲-۲: فرمول های دینامیکی رایج ۳۹
جدول ۳-۱: مقایسه روش Fairhurst و GRLWEAP برای چکش ۲۰ تن ۵۸
جدول ۳-۲: مقایسه روش Fairhurst و GRLWEAP برای چکش ۵ تن ۵۸
جدول ۵-۱: مقادیر ظرفیت بر اساس شکل ۵-۱۱ ..... ۹۳
جدول ۵-۲: مقادیر ظرفیت بر اساس شکل ۵-۱۲ ..... ۹۴
جدول ۵-۳: طول ناحیه فعال نسبت به فاصله دستگاه از شمع ۱۰۴
جدول ۵-۴: مقایسه نتایج PDM با CAPWAP و روش CASE ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: فرورفت دایمی در مقابل انرژی برای رسیدن به یک ظرفیت یکسان ۵

شکل ۲-۱: چکش با احتراق داخلی، دیزل با عملکرد یک طرفه ۱۰

شکل ۲-۲: چکش با احتراق خارجی، عملکرد یک طرفه ۱۲

شکل ۲-۳: چکش ویبره ای ۱۷

شکل ۲-۴: مشخصات سیستم کوبش ۲۶

شکل ۲-۵: نمودار مقاومت – تغییرمکان شمع برای یک ضربه چکش ۲۸

شکل ۲-۶: کار انجام شده برای یک ضربه چکش ۲۹

شکل ۲-۷: شمع و مقاومت در برابر نفوذ: a) حالت ایده آل، b) rigid/plastic، c) elastoplastic [۱۲] ۳۶

شکل ۲-۸: پارامترهای دخیل در انرژی انتقال یافته به شمع ۳۷

شکل ۲-۹: اندازه‌گیری فرورفت دایمی و فشردگی الاستیک (قلم و کاغذ) ۴۳

شکل ۲-۱۰: ثبت فرورفت دایمی و فشردگی الاستیک با استفاده از قلم و کاغذ ۴۴

شکل ۳-۱: نمودار تغییرات فاکتور انرژی و سرعت در مقابل وزن چکش ۵۰

شکل ۳-۲: نمودار فاکتور انرژی و سرعت در مقابل ضریب بازگشت ۵۱

شکل ۳-۳: تغییرات فاکتور انرژی و سرعت در مقابل نسبت امپدانس ۵۲

شکل ۳-۴: تغییرات سرعت در زمان برای چکش‌های مختلف ۵۴

شکل ۳-۵: تغییرات سرعت با زمان برای امپدانس‌های مختلف شمع ۵۵

شکل ۴-۱: اثر طول شمع بر روی فاکتور انرژی ۶۲

شکل ۴-۲: رابطه انرژی و سرعت بر حسب زمان برای طول‌های مختلف ۶۲

شکل ۴-۳: نیروی ایجاد شده در سر شمع برای امپدانس‌های مختلف ۶۳

شکل ۴-۴: اثر طول شمع بر روی فاکتور سرعت ۶۴

شکل ۴-۵: نمودار انرژی منتقل شده به شمع بر حسب زمان برای طول‌های مختلف چکش..... ۶۵
شکل ۴-۶: نمودار سرعت بر حسب زمان برای طول‌های مختلف چکش ۶۵
شکل ۴-۷: تغییرات سرعت سر شمع در مقابل طول شمع برای شمع و چکش‌های مختلف.....۶۶
شکل ۴-۸: تغییرات سرعت سر شمع در مقابل نسبت سختی شمع به بالشتک ۶۷
شکل ۴-۹: نمودار تغییرات مقاومت جداره در مقابل انرژی برای چکش ۸ تن..... ۶۹
شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات مقاومت جداره در مقابل فاکتور سرعت برای چکش ۸تن..... ۷۰
شکل ۴-۱۱: فاکتور انرژی در مقابل نسبت وزن کلاهک به وزن چکش ۷۱
شکل ۴-۱۲: فاکتور سرعت در مقابل نسبت وزن کلاهک به وزن چکش..... ۷۱
شکل ۵-۱: نمودار نتایج ظرفیت **PDA** در مقابل ظرفیت **Heily**..... ۷۹
شکل ۵-۲: مشکلات قرایت فرورفت دایمی و فشردگی الاستیک در روش سنتی..... ۸۲
شکل ۵-۳: تغییرات انرژی وارد شده به شمع شماره ۱ ..... ۸۴
شکل ۵-۴: تغییرات انرژی وارد شده به شمع شماره ۲..... ۸۴
شکل ۵-۵: تغییرات انرژی در ضربه‌های مختلف چکش IHC برای یک شمع..... ۸۵
شکل ۵-۶: تغییرات انرژی چکش برای چکش هیدرولیک با قابلیت کنترل ارتفاع سقوط ۸۶
شکل ۵-۷: گراف باربری..... ۸۷
شکل ۵-۸: پاسخ‌های انرژی – زمان و تغییرمکان – زمان در PDA..... ۹۰
شکل ۵-۹: نمودار انرژی و سرعت در زمان..... ۹۱
شکل ۵-۱۰: تخمین ظرفیت باربری بر اساس روش DMX..... ۹۳
شکل ۵-۱۱: گراف پذیرش شمع بر اساس فرمول انرژی رایج ۹۵
شکل ۵-۱۲: گراف پذیرش شمع بر اساس روش DMX..... ۹۵
شکل ۵-۱۳: رابطه بین حداکثر سرعت و حداکثر انرژی..... ۹۷
شکل ۵-۱۴: میزان انرژی منتقل شده در مقابل هر ضربه برای شمع P25.5A..... ۹۸
شکل ۵-۱۵: رابطه انرژی در مقابل حداکثر تغییرمکان..... ۹۸
شکل ۵-۱۶: رابطه انرژی در مقابل حداکثر سرعت شمع ۹۸

شکل ۵-۱۷: میزان انرژی منتقل شده در مقابل هر ضربه برای شمع P21B ۹۹
شکل ۵-۱۸: رابطه انرژی در مقابل حداکثر سرعت شمع ۹۹
شکل ۵-۱۹: رابطه انرژی در مقابل حداکثر تغییرمکان ۹۹
شکل ۵-۲۰: میزان انرژی منتقل شده در مقابل هر ضربه برای شمع P25.5A ۱۰۰
شکل ۵-۲۱: رابطه انرژی در مقابل حداکثر تغییرمکان ۱۰۰
شکل ۵-۲۲: رابطه انرژی در مقابل حداکثر سرعت شمع ۱۰۰
شکل ۵-۲۳: مقایسه تغییرمکان سر شمع در مقابل زمان برای دو دستگاه PDA و PDM ۱۰۲
شکل ۵-۲۴: مقایسه سرعت سر شمع در مقابل زمان برای دو دستگاه PDA و PDM ۱۰۲
شکل ۵-۲۵: نمای کلی دستگاه PDM ۱۰۳
شکل ۵-۲۶: ابعاد برچسب نسبت به فاصله دستگاه از شمع ۱۰۴
شکل ۵-۲۷: شماتیک اندازه‌گیری بوسیله دستگاه PDM ۱۰۴
شکل ۵-۲۸: داده‌برداری بوسیله دستگاه PDM ۱۰۵
شکل ۵-۲۹: تغییرمکان سر شمع اندازه‌گیری شده با PDM بر حسب زمان برای شمع N6-1. ۱۰۸
شکل ۵-۳۰: سرعت و نیروی ثبت شده بوسیله PDA در شمع N6-1 ..... ۱۰۹
شکل ۵-۳۱: موج پایین رونده و بالارونده در مقابل زمان برای شمع N6-1 ..... ۱۰۹
شکل ۵-۳۲: مقایسه سرعت اندازه‌گرفته شده با PDM با سرعت ثبت شده با PDA برای شمع N6-1 ..... ۱۱۰
شکل ۵-۳۳: اندازه‌گیری حداکثر شتاب زمین و حداکثر سرعت ذرات ۱۱۱

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

رفتار خاک‌ها تحت بارهای دینامیکی از گستردگی و پیچیدگی بسیار زیادی برخوردار است که علی‌رغم مطالعات، تحقیقات و کارهای مختلفی که تا به حال صورت گرفته هنوز زمینه‌های بسط مطالعات و گسترش تحقیقات در زمینه‌های مختلف وجود دارد. شمع از جمله سازه‌هایی است که به طور کامل دارای اندرکنش با خاک است و همچنین نقش بسیار مهمی در پایداری سازه‌های مستقر بر آن ایفا می‌کند. در واقع بارهای ناشی از سازه ابتدا به پی وارد می‌شود و پی این بارها را به خاک زیر خود انتقال می‌دهد، بنابراین پی نقش انتقال بار از روسازه به خاک زیرین خود را ایفا می‌کند. در این میان شمع‌ها که جز پی‌های عمیق محسوب می‌شوند وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که لایه‌های سطحی خاک مقاومت کافی برای تحمل بارهای سازه نداشته باشند. از طرفی تخمین نسبتا دقیق ظرفیت باربری شمع‌ها همواره مورد سوال مهندسان بوده است. در این راستا معادلات تجربی زیادی توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است که تقریبا همگی آنها دارای این نقص عمده می‌باشند که نمی توانند ظرفیت باربری استاتیکی شمع را بطور مستقیم تخمین زنند.

۱-۲- فرمول‌های دینامیکی

اگر چه شمع‌ها از سالیان خیلی دور در مهندسی عمران مطرح بوده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی مشخص کردن ظرفیت باربری آنها بطور دقیق و بدون نیاز به آزمایش بارگذاری استاتیکی همواره مطلوب مهندسین و پژوهشگران در این زمینه بوده است.

بعنوان مثال تحقیقاتی در زمینه شناخت عملیات کوبش شمع به منظور پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع صورت گرفته است.

در نخستین گام‌های استفاده از نتایج شمع‌کوبی به منظور پیش‌بینی ظرفیت باربری، قوانین نیوتن با فرض آنکه انرژی چکش به بخش فوقانی شمع منتقل می‌شود، بکار گرفته شد. در این روش شمع به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفته شد[۱]. روابط زیادی نیز بر این اساس تحت

عنوان روابط ENR استخراج شده که از دقت بسیار پایینی برخوردار بوده‌اند. این روابط که از سال ۱۸۵۰ به بعد منتشر شده‌اند، به دلیل سادگی علیرغم دقت پایین، بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به طور کلی روابط مذکور دارای شکل کلی معادله زیر بوده اند[۱].

$$R_u = \frac{W_r h}{s.F} \qquad (۱-۱)$$

که در آن R_u: ظرفیت باربری مجاز، W_r: وزن چکش، h: ارتفاع سقوط چکش، s: میزان نشست شمع در اثر آخرین ضربه، F: ضریب اطمینان است.

در این زمینه مهمترین روابطی که معرفی شده‌اند رابطه ENR که در بالا اشاره شد، روابط Danish (1967)، Hiley (1930) ، Janbu (1951)، PCUBC، Weisbach (1850)، Eytelwein (1820)، Navy-Mckay، Gates (1957)، WSDOT و AASHTO می‌باشند [۱].

همانطور که اشاره شد روابط تجربی زیادی برای تخمین ظرفیت باربری شمع ارایه شده است و تا جایی که دانش نگارنده اجازه می‌دهد، تمامی این روابط بر اساس انرژی رسیده به شمع و میزان فرورفت شمع می‌باشد. اما مشکل کلی که این روابط دارند، این است که قادر نیستند ظرفیت استاتیکی را از ظرفیت دینامیکی جدا کنند. همچنین نمی‌توانند میزان انرژی رسیده به شمع را بطور دقیقی تخمین بزنند. لذا معمولا این روابط با نتایج آزمایشات استاتیکی یا دینامیکی همسان سازی می‌شوند.

در راستای دستیابی به این نیاز مهندسین مطالعات زیادی در زمینه آنالیز دینامیکی کوبش شمع‌ها انجام داده‌اند. پرداختن به جزییات بیشتر در این زمینه، نهایتا منجر به ایجاد روش معادله موج شد. این روش رفتار خاک و شمع را به طور دقیق‌تری در نظر می‌گیرد، اولین ایده جهت آنالیز عملیات کوبش شمع به کمک امواج تنشی حاصل از ضربه چکش، در حدود صد سال پیش توسط بوسینسک و وانانت در مورد بررسی تأثیر ضربه در انتهای یک میله ارایه شد. و بعد از آن محققان زیادی بر روی آن مطالعه کرده اند و مدل‌های مختلفی در این راستا ارایه داده اند از جمله ای محققان می توان به Smith (1970)، Hirsch et.al (1976)، Coyle & Gibson، Rauche et.al، Dayal & Allen (1975)، Rausche (1970)، Goble (1976)، Heerma (1979)، Litkouhi &

Poskit (1980)، Meynard & corte (1984) ، Simons & Randolp (1985) و بسیاری دیگر که در این زمینه کار کرده اند و مدل‌های مختلفی را برای اندرکنش خاک و شمع و کاربرد معادله موج استخراج نموده اند.

PDA (Pile Driving Analyzer) ابزاری است که مزایای بسیاری در ۳۰ سال اخیر در زمینه کوبش شمع در سرتاسر جهان فراهم نموده است. اما به دلیل هزینه‌بر بودن این آزمایش و نیز تخصصی بودن آنالیزهای مربوطه معمولا ۵٪ از کل شمع‌ها در یک پروژه آزمایش می‌شوند و این بدان معنی است که ۹۵٪ شمع‌ها تست PDA نمی‌شوند. بنابراین ظرفیت اکثر شمع‌ها باید به روش‌های دیگر تخمین زده شوند روش‌هایی نظیر اندازه‌گیری تعداد ضربات یا استفاده از فرمول‌های دینامیکی که نیازمند انرژی رسیده به شمع و نیز میزان فرورفت دایمی[1] شمع به ازای هر ضربه می‌باشند.

اما همانطور که ذکر شد فرمول‌های دینامیکی فرض می‌کنند که انرژی رسیده از چکش به شمع معلوم و ثابت می‌باشد اما در حقیقت، عملکرد چکش‌های کوبش می تواند تا ۳۰٪ و حتی بیشتر تغییر نماید. لذا اندازه‌گیری انرژی بوسیله PDA نمی‌تواند تضمین کند که همان انرژی به شمع‌های تست نشده رسیده است و بنابراین اگر انرژی رسیده به شمع را نتوان چک نمود در نتیجه اندازه‌گیری فرورفت دایمی و تعداد ضربات نمی‌تواند ظرفیت باربری مورد نظر را تضمین نماید. همانطور که در شکل ۱-۱ دیده می‌شود، ۳۰٪ کاهش در انرژی رسیده به شمع (از ۵۰kJ تا ۳۵kJ)، مقدار فرورفت دایمی از ۴۵/۵ به ۲۷/۵ میلیمتر یعنی ۴۰٪ کاهش در فرورفت دایمی رخ می‌دهد.

[1] -Set