

بررسی اثرات انعطاف‌پذیری و جرم کلاهک شمعها در پاسخ لرزه‌ای جانبی سیستم خاک-شمع-سازه

علی کمک‌پناه، دانشیار، گروه خاک و پی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
مجید موحدخواه، کارشناس ارشد گرایش خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

کلیدواژه‌ها: لرزه‌ای؛ انعطاف‌پذیری؛ کلاهک نواری؛ اندرکنش؛ نرم‌افزار SAP2000؛ وینکلر؛ فتر؛ میراگر

با معرفی نوعی کلاهک موسوم به کلاهک نواری، اثرات کاهش جرم و افزایش انعطاف‌پذیری کلاهک شمعها در پاسخ لرزه‌ای جانبی یک سیستم خاک-شمع-سازه، و همچنین عملکرد این نوع کلاهک مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که یک سیستم خاک-شمع-سازه با کلاهکهای نواری و گسترده با ابعاد مختلف مدل گردیده و در معرض بارهای لرزه‌ای مختلف قرار داده شد. سپس مدل‌های مذکور مورد تحلیل قرار گرفته و با توجه به ابعاد کلاهکها، اثرات جرم و سختی کلاهک بر پاسخ سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش انعطاف‌پذیری کلاهک منجر به کاهش نیروهای وارده به سرشمعها، پایه ساختمان و همچنین کاهش نیروهای ایجاد شده در خود کلاهک گردیده و در مقابل، افزایش تغییرمکانها در سرشمع و نیز سازه و کاهش ظرفیت باربری کلاهک را به دنبال خواهد داشت. از طرفی کاهش جرم کلاهک، منجر به کاهش نیروهای برشی و لنگرهای خمشی سرشمعها و همچنین کاهش تغییرمکان در قسمت سرشمعها خواهد گردید. لذا با استفاده از کلاهکهای نواری و با بهینه‌سازی ابعاد نوارها، علاوه بر بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌توان میزان بتن و آرماتور مصرفی را نیز کاهش داد. انجام این تحقیق مستلزم مدلسازی سه بعدی یک سیستم خاک-شمع-سازه با منظور نمودن اثرات کلیه اندرکنشهای موجود در سیستم بود. به این منظور نرم‌افزار المان محدود SAP2000 مورد استفاده قرار گرفت که در آن، رفتار دینامیکی غیرخطی خاک با بهره‌گیری از مدل‌های وینکلر غیرخطی مبتنی بر منحنی‌های $p-y$ و به صورت سیستم‌های فتر-میراگر مدل گردید.

۱- مقدمه

خسارات وارده به شمعها و سازه‌های قرار گرفته بر روی آنها در طول زلزله‌های مختلف باعث انجام تحقیقات گسترده‌ای به منظور شناخت و تحلیل لرزه‌ای سیستم‌های خاک-شمع-سازه گردیده است. در این بین، رفتار فونداسیون شمعی، فاکتور مهم و مؤثری بر عملکرد این سیستم‌ها می‌باشد. میزان پتانسیل خرابی و آسیب به شمعها، اولین بار در زلزله آلاسکا در سال ۱۹۶۴ آشکار گردید. همچنین در زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ نیز مشاهدات مختلفی در مورد عملکرد شمعها به دست آمد. بررسی نمونه‌های تخریب شده در اثر زلزله کوبه توسط ماتسوی و اودا در سال ۱۹۹۶ نشان داد که بیشتر ترکهای مشاهده شده در شمعها در نزدیکی محل اتصال به سر شمع (در محل گشتاور حداکثر)، محل تغییر تراکم آرماتورها و یا در محل اندرکنش بین لایه‌های نرم و سخت خاک بوده است [۱].

علی‌رغم پیشرفت سریع روشهای طراحی و آنالیز به منظور ارزیابی رفتار شمعها تحت بارهای لرزه‌ای در سالهای اخیر، این روشها هنوز هم بعضاً با تردید همراه است. عمدتاً وجود دو عامل باعث این تردیدها و عدم قطعیتها گردیده است: عامل نخست، به دست آوردن پارامترهای فیزیکی برای ارزیابی سیستم است. عامل دیگر نیز، پیچیدگی تحلیل سیستم‌های دارای فونداسیون شمعی، به دلیل اندرکنشهای مختلف بین اجزاء یک سیستم خاک-شمع-سازه (از جمله

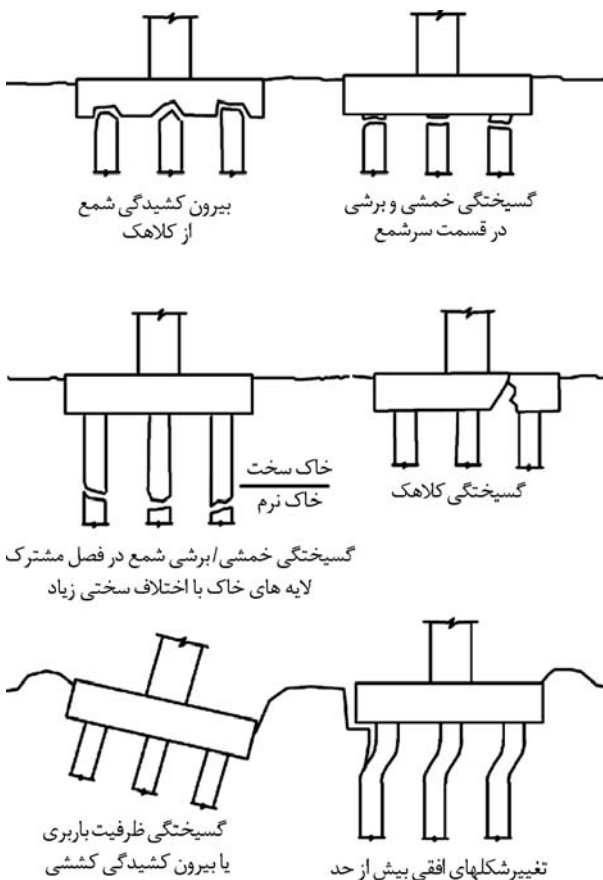
ناشی از قرارگیری لایه‌های نرم و سخت در کنار هم و یا سست شدن تحت اثر روانگرایی و یا تغییر شکل زیاد تحت بار زلزله باشد.

۳. ناکافی بودن اتصال سازه‌ای در تماس شمع و کلاهک نیز سبب گسیختگی برشی در سر شمع می‌شود.

۴. اعمال بار و یا جابه‌جاییهای بزرگ بر روی شمع توسط یک لایه خاک غیر روانگرا با انتشار افقی زیاد، که روی لایه روانگرا قرار گرفته، که اغلب خرابیهای وسیعی را در شمعها ایجاد می‌کند.

۵. کاهش ظرفیت باربری شمع به دلیل سست شدن خاک در هنگام روانگرایی، که در ترکیب با مد دورانی ناشی از نیروهای اینرسی سازه‌ای، سبب نشست، گسیختگی ناشی از اثر سوراخ‌شوندگی و یا گسیختگی کششی می‌شود.

در شکل (۱)، حالت‌های عمومی خرابی فونداسیون گروه شمع تحت نیروی زلزله، نشان داده شده‌اند.



شکل (۱): حالت‌های خرابی فونداسیون گروه شمع تحت نیروی زلزله [۳].

اندرکنش سینماتیکی خاک- شمع، اندرکنش اینرسیال ناشی از روسازه و میرایی تابشی) و عدم شناخت و فهم کامل مکانیسم‌های موجود در اندرکنش خاک- شمع- سازه، می‌باشد. رفع این تردیدها و عدم قطعیتها گام مهمی در چاره‌جویی در برابر خطرات زلزله می‌باشد [۲].

به عنوان مکانیسم خسارات وارده به شمع، بیشتر افرادی که آن را بررسی کرده‌اند، آن را نتیجه نیروهای ارتعاشی اینرسیال روسازه و همچنین پاسخ لرزه‌ای لایه‌های خاک می‌دانند. در ترازهای پایین لرزش اندرکنشهای سینماتیکی معمولاً پاسخ ساختمان را تحت اثر قرار داده و طولانی شدن پریود و افزایش میرایی تابشی به وجود آمده سبب استهلاک انرژی و کاهش حرکات می‌شود. در لرزه‌های زیاد، کاهش مدول خاک و فاصله ایجاد شده بین خاک و شمع سبب جلوگیری از میرایی تشعشعی و غلبه نیروهای اینرسی سازه‌ای شده و اثرات کلی بر روی کاهش مقادیر طیفی، تقلیل می‌یابد. وقتی اجزای سیستم تسلیم می‌شوند، پریود سازه افزایش یافته و میرایی تشعشعی نیز از بین می‌رود که این افزایش پریود می‌تواند در جهت و یا خلاف جهت پریود تشدید باشد.

با مشاهده شمعهای آسیب دیده در حین زلزله‌ها می‌توان مکانیسم‌ها و حالت‌های مختلف خرابی شمعها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرد. لازم به ذکر است که خرابی شمع به صورت کمبود ظرفیت سازه‌ای شمع و یا کمبود ظرفیت انتقال بار خاک- شمع تعریف می‌شود. این حالتها عبارتند از [۳]:

۱. کاهش اثر تکیه‌گاه جانبی شمع بر اثر روانگرایی خاکهای دانه‌ای و یا نرم‌شدگی کرنش در خاکهای چسبنده در نزدیکی سر شمع. این کاهش وقتی با نیروهای اینرسی بزرگ سازه‌ای ترکیب می‌شود، تغییرمکان و کرنشهای خمشی بزرگی را در نزدیکی سر شمع ایجاد کرده و در نهایت سبب خرابی شمع به خصوص در محل اتصال شمع به کلاهک می‌شود.

۲. کرنشهای ایجاد شده در اندرکنش بین لایه‌های خاک با اختلاف امپدانس زیاد که این اختلاف می‌تواند

مختلف، اثرات انعطاف‌پذیری و همچنین جرم کلاهک در پاسخ لرزه‌ای جانبی سیستم بررسی گردیده و عملکرد لرزه‌ای کلاهکهای نواری در مقایسه با کلاهکهای گسترده مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق، در نظرگیری صحیح اندرکنشهای موجود در سیستم و در نتیجه انجام تحلیل یکپارچه سیستم ضروری می‌باشد. لذا با توجه به حجم تحلیل‌ها و اهداف مربوطه، سیستم خاک-شمع-سازه توسط نرم‌افزار SAP2000 و با روش منحنی‌های $p-y$ مدل گردیده و در معرض شتاب جانبی ناشی از زلزله‌های مختلف قرار داده شده است.

۲- مدل‌های تحلیلی و روش حل

با توجه به بررسیها و اهداف موردنظر در این تحقیق بایستی هم فونداسیون و هم روسازه در یک زمان مدل گردیده و اثرات کلیه اندرکنشهای موجود در سیستم به صورت همزمان در نظر گرفته شوند. لذا یک سیستم سه بعدی خاک-شمع-سازه به منظور استفاده در تحلیل‌ها اختیار گردید. این سیستم شامل یک ساختمان ۲۱ طبقه بتن آرمه قرار گرفته بر روی یک فونداسیون شمعی می‌باشد. این سیستم در معرض بارهای لرزه‌ای قرار داده شده و توسط نرم‌افزار المان محدود SAP2000 و با استفاده از روشهای عددی تحلیل دینامیکی غیرخطی موجود در این نرم‌افزار، مورد تحلیل قرار گرفته است.

در مدلسازی خاک از روش تیر بر روی بستر غیرارتجاعی وینکلر و منحنی‌های $p-y$ استفاده گردیده که در آن خاک توسط سیستم فنرهای با رفتار غیرخطی و میراگرهای ویسکوز مدل می‌گردد. به این منظور از المانهای *link* غیرخطی موجود در نرم‌افزار استفاده گردید. لیکن رفتار اعضای سازه‌ای به دلیل حجم زیاد تحلیل‌ها الاستیک فرض گردید. به همین دلیل در تحلیل‌ها از زلزله‌های سطح بهره‌برداری استفاده شده است.

۲-۱- هندسه و مشخصات مدل

سازه مورد نظر، یک ساختمان ۲۱ طبقه بتنی به ارتفاع

به طور کلی ارزیابی رفتار پی‌های شمعی نیازمند بررسی موارد زیر می‌باشد:

- بارهای وارد بر شمع و همچنین اتصالات کلاهک شمع؛

- تغییرشکل‌های گذرا و دائمی فونداسیون؛

- تأثیر فونداسیون شمع بر روی پاسخ دینامیکی سازه رو بنا و بالعکس.

میزان و چگونگی اثرات اندرکنشهای موجود بین اجزای

یک سیستم خاک-شمع-سازه، وابسته به مشخصات

فیزیکی و مکانیکی فونداسیون (خاک، شمعها، کلاهک

شمعها)، و همچنین مشخصات روسازه می‌باشد و در این

بین، کلاهک شمعها به عنوان منبع مهمی از جرم و میرایی

در سیستم، می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی پاسخ لرزه‌ای

سیستم خاک-شمع-سازه داشته باشد.

مشاهدات در خصوص مکانیسم‌های خرابی

فونداسیونهای شمعی آسیب‌دیده در اثر زلزله، مبین این

است که به دلیل ایجاد برش و لنگر زیاد در سرشمع، در این

قسمت از شمع گسیختگی اتفاق می‌افتد.

اخیراً تحقیقات نشان داده است که در مورد گروه

شمعهایی که در معرض بارهای جانبی قرار گیرند، مخصوصاً

در مواردی که شمعها دارای سختی نسبتاً زیادی باشند،

انعطاف‌پذیری کلاهک شمعها می‌تواند نیروی برشی و لنگر

خمش‌ی وارده به سرشمعها را به طور قابل توجهی تحت تأثیر

قرار داده و به طور کلی سختی کلاهک می‌تواند اثر مهمی

در عملکرد لرزه‌ای سیستم داشته باشد [۴-۵]. از طرفی،

هنگامی که کلاهکهای گسترده در معرض بارهای استاتیکی

یا دینامیکی قرار می‌گیرند، توزیع بار وارده بر روی کلاهک،

معمولاً در نوارهایی در بین شمعها صورت می‌گیرد [۶] که

این موضوع با مدلسازی و تحلیل چندین مدل فونداسیون

مختلف توسط مؤلفین این مقاله نیز مورد بررسی و تأیید

قرار گرفت.

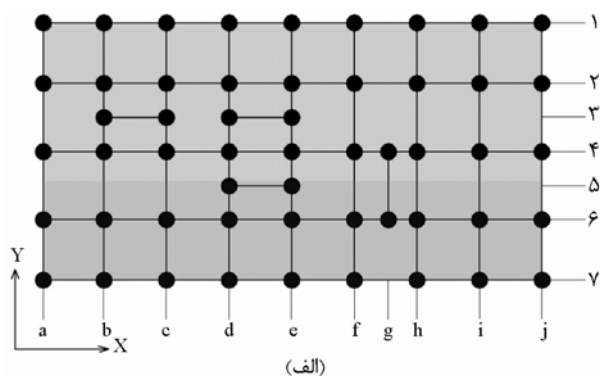
لذا می‌توان نوع جدیدی از کلاهک معرفی کرد که در

آن، شمعها توسط تیرهای عمیقی به یکدیگر متصل

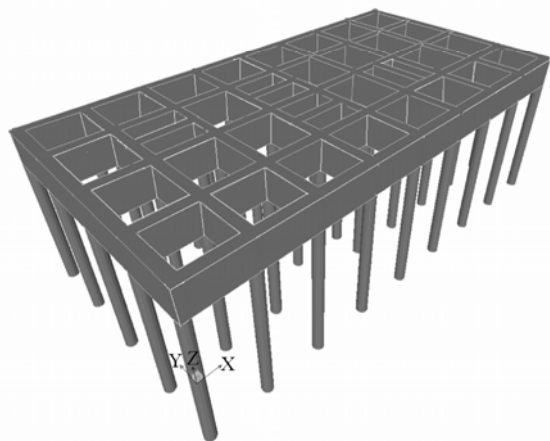
گردیده‌اند و در این مقاله، کلاهک نواری نامیده شده است.

در این تحقیق، با استفاده از کلاهکهای نواری با ابعاد

مختلف نوارها و همچنین کلاهکهای گسترده با ضخامت‌های



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) پلان فونداسیون شمعی (ب) شمایی سه بعدی از نمونه‌ای از فونداسیون شمعی با کلاهک نواری.

سیستم خاک-شمع-سازه انجام گیرد. لذا نرم‌افزار انتخابی بایستی قابلیت مدلسازی توأم خاک و هم سازه را داشته باشد. از طرفی با توجه به دلایل زیر، روش مدلسازی خاک توسط فنرهای غیرخطی و میراگرهای مجزا در طول شمعها (مدل وینکلر) انتخاب گردید. این دلایل عبارت بود از:

۱. مدلسازی سه بعدی خاک، نیاز به در نظر گرفتن حجم زیادی از خاک اطراف دارد؛
۲. توجه ما بیش از اینکه به بررسی دقیق پاسخ خاک اطراف سیستم معطوف باشد، بر روی اجزاء سازه‌ای (شمعها و کلاهک و روسازه) متمرکز است.
۳. با توجه به اینکه باید تعداد قابل توجهی تحلیل دینامیکی انجام گیرد، مدلسازی سه بعدی خاک با توجه به حجم بالا و زمانبر بودن عملاً منتفی است. لذا با استفاده از روش وینکلر، زمان تحلیل‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

با بررسیهایی که انجام گرفت، نرم‌افزار SAP2000 نسخه Advanced 11.0.0 با توجه به انواع المانهای پیوند موجود

۷۲ متر از روی فونداسیون، و با ابعاد ۴۴×۲۲/۵ متر در پلان می‌باشد. سیستم باربر جانبی آن از نوع قاب خمشی بتنی متوسط همراه با دیوار برشی بتن مسلح، و فونداسیون آن از نوع شمعی می‌باشد.

در فونداسیون شمعی در نظر گرفته شده، شمعها توسط یک کلاهک بتنی به یکدیگر متصل گردیده و در زیر هر ستون یک شمع قرار دارد. در این تحقیق دو نوع کلاهک با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نوع اول کلاهکهای به شکل نواری هستند. مدل‌های مربوط به این کلاهکها با علامت اختصاری F_{wxh} مشخص گردیده‌اند، که h عمق و w عرض تیرهای کلاهک بر حسب متر می‌باشند. نوع دوم، کلاهکهای به شکل گسترده می‌باشند که در این نوع کلاهک، شمعها به وسیله دال بتنی ضخیمی به یکدیگر متصل گردیده‌اند. این کلاهکها با علامت اختصاری mat_h مشخص شده‌اند، که h ضخامت کلاهک بر حسب متر است. متغیر h دارای مقادیر ۱/۵، ۲/۳ و ۳ متر، و متغیر w دارای مقادیر ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ متر می‌باشند که در مجموع ۱۵ کلاهک مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فونداسیون دارای ۵۳ شمع بتنی با قطر ۱ متر که از زیر کلاهک بتنی شروع شده و تا سنگ بستر ادامه می‌یابند. در شکل (۲)، شمایی سه بعدی و همچنین پلان یک کلاهک نواری به طور نمونه نشان داده شده است.

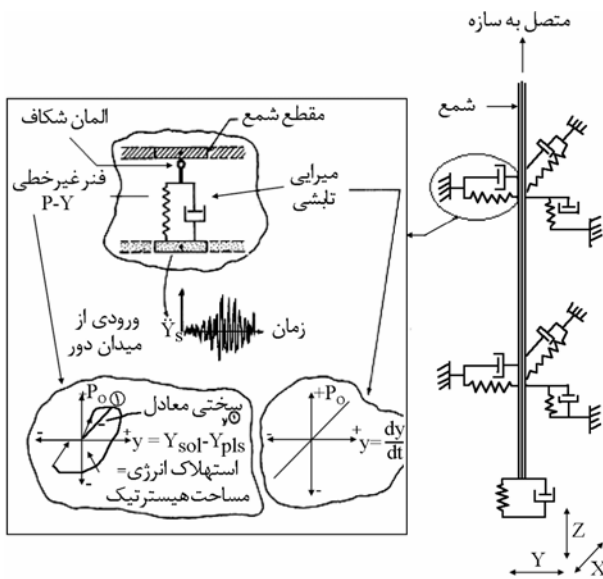
با توجه به تمرکز بر روی پاسخ سیستم در برابر بارهای جانبی و به منظور ساده‌سازی مدل، فرض گردیده که نوک شمعها بر روی یک بستر سنگی مقاوم در عمق ۱۵ متری قرار گرفته است. خاک مورد استفاده، از نوع ماسه شل غیراشباع فرض گردیده و مشخصات آن به شرح زیر است:

$$\gamma = 17 (km/m^3) \quad \phi = 30 \quad e = 0.65 \quad \nu = 0.3$$

K (مدول اولیه عکس‌العمل بستر) = ۱۲۵۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع که γ ، ϕ ، e و ν ، به ترتیب وزن واحد حجم، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت تخلخل و ضریب پواسون محیط خاکی مابین شمعها می‌باشند.

۲-۲-۲- نرم‌افزار مورد استفاده

با توجه به اهداف این تحقیق، بایستی تحلیل‌ها به صورت کاملاً یکپارچه و با در نظرگیری اثرات کلیه اندرکنشها در



شکل (۳): مدل سه بعدی شمع-خاک به روش BNWF

مقادیر مربوط به فنرهای غیرخطی $p-y$ در اعماق مختلف، از روابط ارائه شده توسط پارکر و ریس [۱۲] که در آیین‌نامه API [۱۱] نیز از آنها استفاده شده است، محاسبه گردیده‌اند. مقدار به دست آمده برای p توسط این روابط، در واقع نیروی بسیج شده در خاک در واحد طول شمع می‌باشد که در اثر تغییر مکان y شمع در خاک بسیج شده است. با ضرب مقدار p به دست آمده از این روابط در فاصله فنرهای متوالی می‌توان رفتار نیرو-تغییر مکان فنرهای غیرخطی را به دست آورد. مقادیر مربوط به فنرهای غیرخطی در اعماق مختلف در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

همچنین به منظور محاسبه ضریب میراگرها از رابطه زیر استفاده شده است [۱۳]:

$$c(a_0, Z) = Qa_0^{-0.25} \rho_s V_s d \quad (1)$$

که c ضریب میرایی در واحد طول شمع، a_0 پارامتر فرکانس بدون بعد ($a_0 = \frac{\omega d}{V_s}$)، فرکانس زاویه ای، ρ_s دانسیته خاک، V_s سرعت موج برشی در وسط خاک، d قطر شمع و Q نیز ضریبی وابسته به عمق و ضریب پواسون می‌باشد. با ضرب مقدار c در فاصله میراگرها، ضریب هر میراگر به دست می‌آید [۱۳]، جدول (۲).

۲-۴- بارگذاری

بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ به منظور تحلیل تاریخچه زمانی

در آن، که می‌توانست در مدلسازی خاک به روش وینکلر مورد استفاده قرار گیرد، و با در نظر گیری قابلیت‌های ویژه و توان آن در تحلیل سازه‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- مدلسازی خاک

به منظور مدلسازی خاک در این تحقیق از روش BNWF با استفاده از منحنی‌های $p-y$ ، استفاده شده است [۷-۱۱]. بر اساس روش BNWF می‌توان یک سیستم خاک-شمع را به صورت چندین المان تیری متوالی دارای سختیهای محوری، برشی و خمشی (مدل شمع) که در گره‌ها به المانهای فنر و میراگر (مدل خاک) متصل شده‌اند، مدل نمود. فنرها برای مدلسازی رفتار غیرخطی خاک و همچنین میرایی هیسترسیس خاک در بارگذاریهای دینامیکی و میراگرها برای مدلسازی میرایی تابشی امواج منتشره از سوی شمعها در محیط بینهایت خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

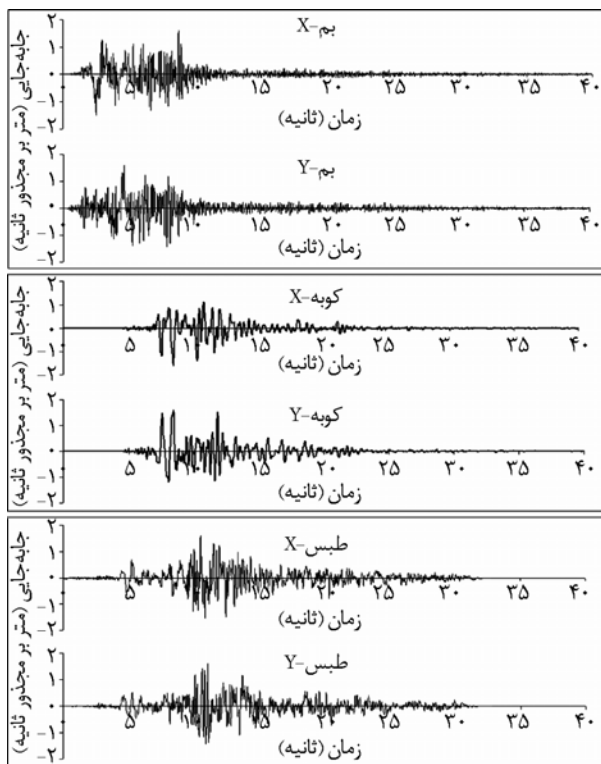
در مدل 3D معمولاً المانهای فنر و میراگر موازی، در هر گره در سه جهت تعریف می‌شوند: در دو جهت افقی عمود بر هم که بیانگر مقاومت جانبی خاک بر اساس مدل $p-y$ است و در جهت محور شمع که بیانگر مقاومت جدارای خاک بر اساس منحنیهای $t-z$ است. در گره مربوط به نوک شمع، یک فنر-میراگر قائم که بیانگر مقاومت نوک بر اساس منحنی $q-z$ است نیز قرار داده می‌شود. در مدل حاضر، به دلیل قرار گرفتن نوک شمعها بر روی سنگ بستر، در محل نوک شمع از تکیه‌گاه استفاده شده است. همچنین از مقاومت جدارای خاک صرف نظر شده است. لازم به ذکر است که در تحلیل لرزه‌ای به روش مذکور، پاسخ میدان آزاد زمین به انتهای المانهای فنر و میراگر اعمال خواهد شد. موارد مذکور در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

در این تحقیق، رفتار $p-y$ فنرهای غیرخطی به وسیله المان پیوند پلاستیک غیرخطی با رفتار هیسترسیس سینماتیک در نرم افزار SAP2000 استفاده گردید. همچنین میرایی تابشی به وسیله المان میراگر ویسکوز موجود در این نرم افزار مدل گردید. در هنگام مدلسازی از ترکیب این المانها (فنر-میراگرهای موازی) در فواصل ۱ متری در طول شمع استفاده گردیده است.

در آنها کمتر از مقدار مشخص شده در آیین نامه نباشد. لذا سه جفت شتابنگاشت مربوط به حرکات افقی زمین لرزه‌های طبس، بم و کوبه انتخاب گردیدند. البته با توجه به اینکه ساختگاه سازه مورد نظر به صورت فرضی بوده و اصولاً هدف طراحی سازه نیز در میان نمی‌باشد، شرایط مشابهت با زلزله طرح و مطابقت با ساختگاه در این انتخاب ممکن است به طور کامل رعایت نگردیده باشد. در عوض با توجه به محتوای فرکانسی متفاوت این شتابنگاشت‌ها و خصوصیات متفاوت هر کدام، به منظور اینکه نتایج از جامعیت بیشتری برخوردار گردند، این انتخاب صورت پذیرفت.

طبق آیین نامه ۲۸۰۰، برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی بایستی شتابنگاشت‌ها بر اساس بند ۲-۴-۱-۴ آیین نامه اصلاح گردیده و سپس در دو جهت عمود بر هم و در امتدادهای اصلی سازه به آن اثر داده شوند. با توجه به اینکه تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق با فرض خطی بودن سازه انجام گرفته، شتابنگاشت‌ها بر اساس زلزله سطح بهره‌برداری اصلاح گردیدند.

در نهایت پس از همپایه کردن و اصلاح شتابنگاشت‌های اولیه، سه شتابنگاشت نشان داده شده در شکل (۴) با مقدار $PGA = 0.16g$ به دست آمدند.



شکل (۴): شتابنگاشت‌های اصلاح شده بم، کوبه و طبس ($PGA=0.16g$)

بایستی حداقل سه جفت شتابنگاشت مورد استفاده قرار گیرند که این شتابنگاشت‌ها بایستی شرایط زلزله طرح را ارضاء نموده و از لحاظ ساختگاه دارای مطابقت با زمین محل ساختمان مشابهت داشته باشند. همچنین مدت زمان حرکت شدید زمین

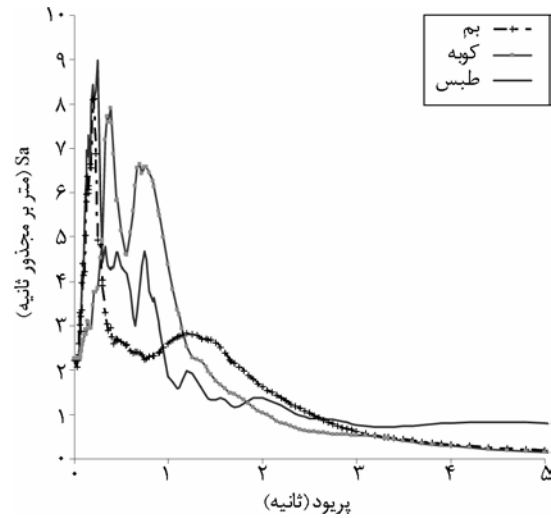
جدول (۱): مقادیر مربوط به منحنی‌های $p-y$ در اعماق مختلف.

P (کیلو نیوتن)		عمق (متر)																					
عمق (متر)	۱۰=۷ سانتیمتر	۵=۷ سانتیمتر	۲=۷ سانتیمتر	۱=۷ سانتیمتر	۰.۵=۷ سانتیمتر	۰.۳=۷ سانتیمتر	۰.۲=۷ سانتیمتر	صفر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۱	۶۴	۶۴	۶۴	۶۰	۴۵	۲۲	صفر	۶۴	۱۸۲	۳۵۵	۵۸۲	۸۶۴	۱۲۰۰	۱۵۹۱	۲۰۳۵	۲۵۲۳	۳۰۸۵	۳۶۸۸	۴۳۴۲	۵۰۴۵	۵۵۵۲	۵۹۴۹	
۲	۶۴	۶۴	۱۸۰	۱۵۴	۱۰۰	۴۴	صفر	۱۸۲	۳۵۵	۵۸۲	۸۶۱	۱۱۹۲	۱۵۶۸	۱۹۸۷	۲۴۴۳	۲۹۳۱	۳۴۴۶	۳۹۸۳	۴۵۳۸	۴۹۶۱	۵۳۱۵		
۳	۶۴	۶۴	۳۴۰	۲۶۳	۱۵۷	۶۷	صفر	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰	۳۴۰
۴	۶۴	۶۴	۵۳۲	۳۷۸	۲۱۴	۸۹	صفر	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲	۵۳۲
۵	۶۴	۶۴	۷۴۵	۴۹۵	۲۷۲	۱۱۲	صفر	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵	۷۴۵
۶	۶۴	۶۴	۹۷۱	۶۱۲	۳۲۹	۱۳۴	صفر	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱	۹۷۱
۷	۶۴	۶۴	۱۲۰۵	۷۲۹	۳۸۶	۱۵۷	صفر	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵	۱۲۰۵
۸	۶۴	۶۴	۱۴۴۲	۸۴۶	۴۴۳	۱۸۰	صفر	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲	۱۴۴۲
۹	۶۴	۶۴	۱۶۸۲	۹۶۲	۵۰۰	۲۰۲	صفر	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲	۱۶۸۲
۱۰	۶۴	۶۴	۱۹۲۲	۱۰۷۸	۵۵۶	۲۲۵	صفر	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲	۱۹۲۲
۱۱	۶۴	۶۴	۲۱۶۱	۱۱۹۳	۶۱۳	۲۴۷	صفر	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱	۲۱۶۱
۱۲	۶۴	۶۴	۲۴۰۱	۱۳۰۸	۶۷۰	۲۷۰	صفر	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱	۲۴۰۱
۱۳	۶۴	۶۴	۲۶۳۹	۱۴۲۳	۷۲۶	۲۹۲	صفر	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹	۲۶۳۹
۱۴	۶۴	۶۴	۲۸۵۴	۱۵۳۵	۷۸۲	۳۱۵	صفر	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴	۲۸۵۴
۱۵	۶۴	۶۴	۳۰۵۸	۱۶۴۴	۸۳۸	۳۳۷	صفر	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸	۳۰۵۸

جدول (۲): ضرایب میراگرها در اعماق مختلف.

عمق (متر)	ضریب میرایی (کیلو نیوتن ثانیه بر متر)
۱	۱۷۱۲
۲	۲۱۲۶
۳	۴۳۱۸
۴	۴۷۲۵
۵	۵۰۶۶
۶	۵۳۶۳
۷	۵۶۲۸
۸	۵۸۶۷
۹	۶۰۸۷
۱۰	۶۲۹۱
۱۱	۶۴۸۱
۱۲	۶۶۶۰
۱۳	۶۸۲۹
۱۴	۶۹۸۹
۱۵	۷۱۴۱

در شکل (۵)، طیف پاسخ ترکیبی شتابنگاشت‌های اصلاح شده بم، طبس و کوبه نشان داده شده است.



شکل (۵): طیف پاسخ ترکیبی شتابنگاشت‌های اصلاح شده بم، کوبه و طبس.

تشکیل می‌گردد.

در نرم‌افزار SAP، این تحلیل را می‌توان در ادامه تحلیل‌های غیرخطی دیگر انجام داد. در مدل‌های موجود ابتدا یک تحلیل استاتیکی غیرخطی برای بارهای ثقلی و با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ ، انجام گردیده و در ادامه آن تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای بار زلزله صورت پذیرفته است. در این تحقیق، برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس انتگرال‌گیری مستقیم از روش هیلبر-هانجز-تیلور (HHT) استفاده گردیده که در اصل، توسعه یافته روش نیومارک می‌باشد.

۳- اثرات کلاهدک در پاسخ سیستم شمع-خاک-سازه

در گروه شمعها، توزیع بارهای قائم و افقی و لنگرهای واژگونی در میان کل شمعها، ضرورت دارد. به این منظور معمولاً از صفحه گسترده به نام کلاهدک استفاده می‌گردد.

در حالت کلی میزان بار انتقال یافته به شمعها، وابسته به مشخصات هندسی و مکانیکی کلاهدک، موقعیت و امتداد شمعها، نحوه اتصال سرشمع، و مشخصات بارهای وارده می‌باشد. نقش کلاهدک بتنی، ایجاد یک صلبیت عرضی به منظور محدود نمودن تغییرشکل سرشمعها و همچنین انتقال و توزیع مناسب بارهای وارده بین شمعها، می‌باشد. لذا مسأله صلبیت یا انعطاف پذیری آن، اثر مهمی در میزان بار انتقال یافته دارد.

همان گونه که در ابتدای مقاله اشاره شد، کلاهدکهای گسترده در معرض بارهای استاتیکی یا دینامیکی قرار می‌گیرند، توزیع بار وارده بر روی کلاهدک در معرض بارهای جانبی، معمولاً در نوارهایی در بین شمعها صورت می‌گیرد و لذا به نظر می‌رسد که به جای کلاهدکهای گسترده، می‌توان از نوعی کلاهدک به شکل نواری استفاده نمود. این نوع کلاهدک علاوه بر کاهش حجم بتن‌ریزی، به دلیل انعطاف-پذیر بودن نسبی آن می‌تواند لنگر و نیروی برشی وارده به سرشمعها و ستونها را کاهش دهد.

لذا در ادامه، عملکرد این نوع کلاهدک و اثرات مختلفی که بر روی پاسخ لرزه‌ای یک سیستم خاک-شمع-سازه می‌گذارد، بررسی گردیده است. به این منظور ۱۵ کلاهدکی که در قسمت ۲-۱ معرفی گردید، برای سیستم در نظر

۲-۵- روش تحلیل

در انجام کلیه تحلیل‌ها برای بار زلزله، از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به روش انتگرال‌گیری مستقیم استفاده گردیده است. به طور کلی در تحلیل‌های دینامیکی، معادلات دینامیکی زیر بایستی حل گردند:

$$K.u(t) + C.\dot{u}(t) + M.\ddot{u}(t) = r(t)$$

که u و \dot{u} و \ddot{u} بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب در گره‌های مدل می‌باشند. K ماتریس سختی کل، ساخته شده از انواع المانهای به کار رفته در مدل می‌باشد. M ماتریس قطری جرم است که از میانگین جرم المانها بر روی گره‌ها به دست می‌آید. C ماتریس میرایی، مشهور به میرایی رایلی است که ترکیبی خطی از ماتریس سختی و جرم می‌باشد:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

$$\alpha = \xi_c \cdot \omega \quad \text{و} \quad \beta = \xi_k / \omega$$

که ξ_c و ξ_k بیانگر ضریب میرایی و فرکانس می‌باشند. r نیز بردار بار اعمال شده به سیستم است.

روش انتگرال‌گیری مستقیم، تحلیلی گام‌به‌گام برای محاسبه پاسخ دینامیکی سیستم به بارهای متغیر بر حسب زمان می‌باشد. این روش نسبت به گامهای زمانی حساس بوده و در هر گام زمانی، ماتریس سختی به طور جداگانه

مختلف برای کلاhek، مدول الاستیسیته مختلف و چگالی- های مختلف به بتن تشکیل دهنده کلاhek تخصیص داده شد. سپس به طور واقع گرایانه تری، ۱۵ کلاhek مذکور مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

۳-۱- اثرات سختی کلاhek

به منظور بررسی اثرات سختی یا انعطاف پذیری کلاhek شمع در پاسخ لرزه ای سیستم خاک- شمع- سازه، مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ برای نسبت مدول الاستیسیته فرضی بتن کلاhek (E) به مدول الاستیسیته واقعی بتن کلاhek (EI)، در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل ها نشان داد که با افزایش سختی کلاhek، مجموع لنگرهای خمشی و نیروهای برشی، هم در پایه ساختمان و هم در قسمت سرشمعها افزایش خواهد یافت. در شکل های (۶) و (۷) می توان روند این تغییرات را مشاهده نمود.

همان طور که در این شکلها مشخص است، با افزایش سختی، آهنگ افزایش نیروها در سرشمعها و پایه ساختمان به مرور کاهش یافته و پس از رسیدن به یک سختی خاص، میزان این نیروها تقریباً ثابت می ماند.

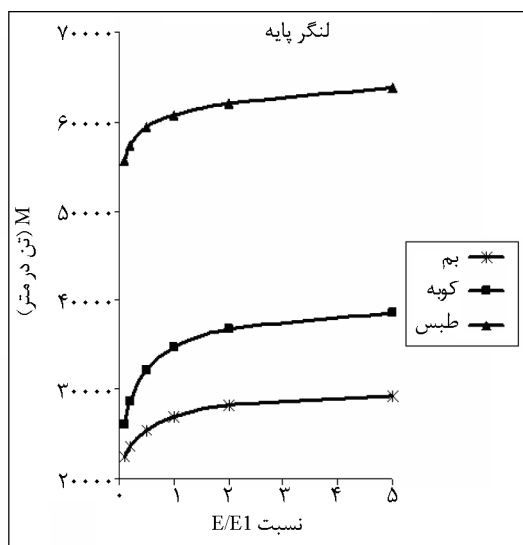
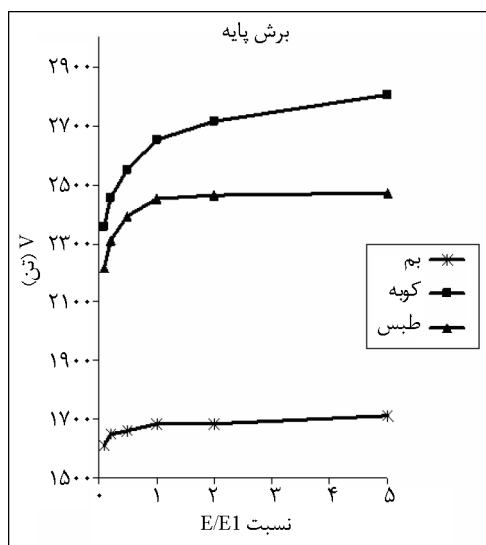
همچنین همان گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، با افزایش سختی کلاhek، میزان نیروهای برشی و لنگرهای خمشی به وجود آمده در قسمتهای مختلف کلاhek نیز افزایش می یابد. در این شکل به عنوان نمونه، تغییرات حداکثر

گرفته شدند. در جدول (۳) مقادیر تقریبی وزن و ممان اینرسی (که رابطه مستقیم با سختی دارد) برای این ۱۵ کلاhek آورده شده است.

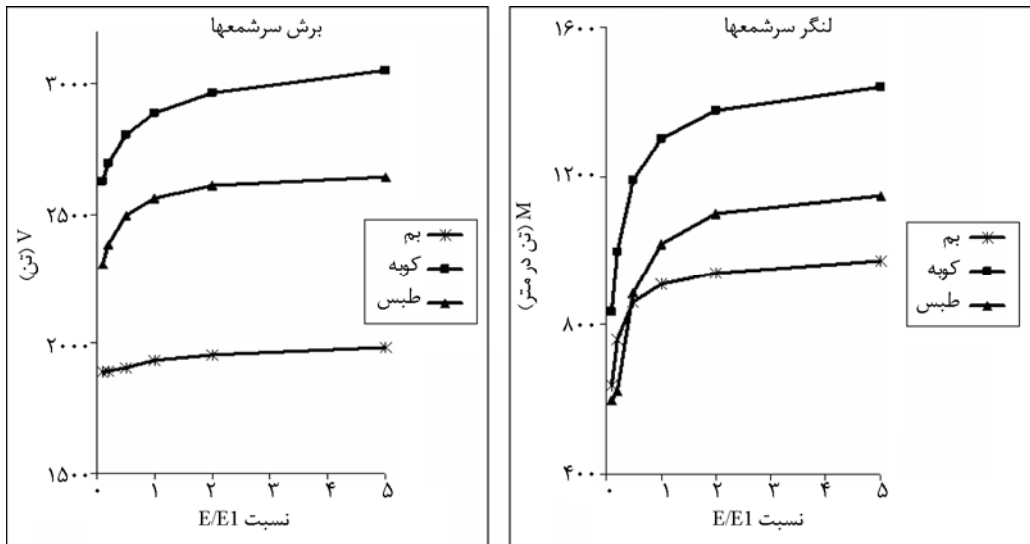
با توجه به اینکه با تغییر ابعاد کلاhek، مقادیر سختی و جرم توأم با یکدیگر تغییر می یابند، ابتدا اثرات هر یک از این دو پارامتر به طور جداگانه بررسی گردیده تا مشخص شود که هر پارامتر به تنهایی چه تأثیری در پاسخ اجزای مختلف سیستم می گذارد. به این منظور، مدل با کلاhek F_{1x3} انتخاب گردیده و برای دستیابی به سختی و جرمهای

جدول (۳): مقادیر تقریبی وزن و ممان اینرسی کلاhekها.

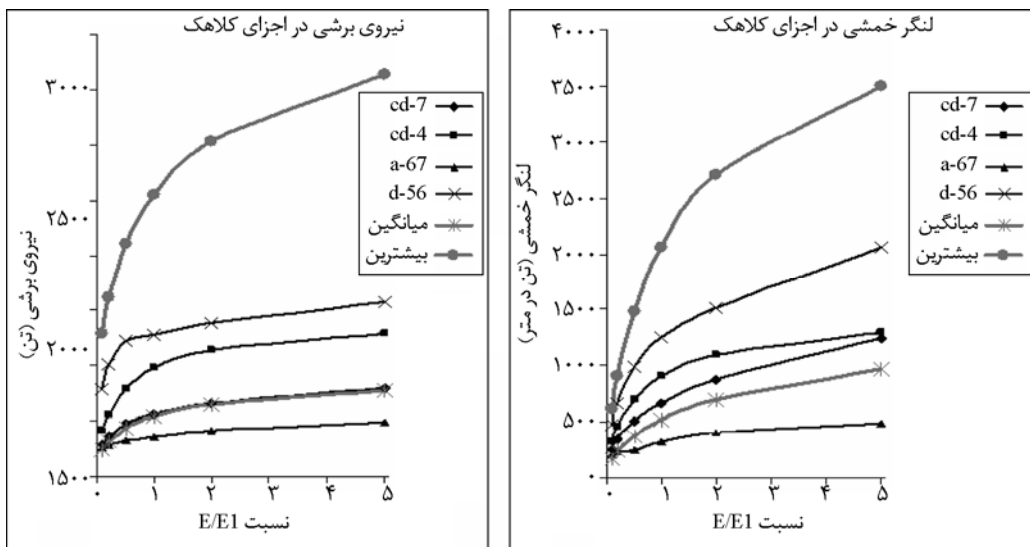
کلاhek	وزن کلاhek (تن)	$I_x (m^4)$	$I_y (m^4)$
$F_{1x1.5}$	۱۴۸۳	۲/۵۳۱	۱/۴۰۶
$F_{1.5x1.5}$	۲۱۰۱	۳/۷۹۷	۲/۱۰۹
$F_{2x1.5}$	۲۶۳۵	۵/۰۶۳	۲/۸۱۳
$F_{3x1.5}$	۳۴۵۶	۷/۵۹۴	۴/۲۱۹
$mat_{1.5}$	۳۷۹۱	۱۲/۳۱۹	۶/۶۰۹
$F_{1x2.3}$	۲۲۷۴	۹/۱۲۵	۵/۰۷۰
$F_{1.5x2.3}$	۳۲۲۱	۱۳/۶۸۸	۷/۶۰۴
$F_{2x2.3}$	۴۰۴۱	۱۸/۲۵۱	۱۰/۱۳۹
$F_{3x2.3}$	۵۲۹۹	۲۷/۳۷۶	۱۵/۲۰۹
$mat_{2.3}$	۵۸۱۳	۴۴/۴۱۰	۲۳/۸۲۷
F_{1x3}	۲۹۶۶	۲۰/۲۵۰	۱۱/۲۵۰
$F_{1.5x3}$	۴۲۰۱	۳۰/۳۷۵	۱۶/۸۷۵
F_{2x3}	۵۲۷۰	۴۰/۵۰۰	۲۲/۵۰۰
F_{3x3}	۶۹۱۲	۶۰/۷۵۰	۳۳/۷۵۰
mat_3	۷۵۸۲	۹۸/۵۵۰	۵۲/۸۷۵



شکل (۶): تغییرات برش پایه و لنگر خمشی پایه، نسبت به سختی کلاhek.



شکل (۷): تغییرات برش سرشمعها و لنگر خمشی سرشمعها، نسبت به سختی کلاهک.



شکل (۸): تغییرات برش و لنگر نسبت به سختی برای تیرهای کلاهک (حاصل از شتابنگاشت طبس).

پذیری کلاهک شمع بر روی پاسخ سیستم می‌باشند. لیکن از طرف دیگر انعطاف پذیر شدن بیش از حد کلاهک می‌تواند یکی از وظایف مهم کلاهک که توزیع مناسب نیروها بین شمعها است را مختل نماید. به منظور بررسی اثر سختی کلاهک بر روی توزیع نیروهای جانبی بین شمعها، از پارامتری به نام درصد پراکندگی استفاده گردید. البته هدف از معرفی این پارامتر، تنها مشاهده چگونگی تغییرات در توزیع نیروها در اعضا بوده و به تنهایی دارای مفهوم کمی خاصی نمی‌باشد. این پارامتر در واقع برگرفته شده از مفهوم انحراف معیار می‌باشد. اگر نیروی وارده به هر عضو f_i ، متوسط نیروی وارده به کلیه اعضا \bar{f} ، و تعداد اعضا برابر با

نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در نواریهای $cd-7$ ، $cd-4$ ، $a-67$ ، $a-56$ نشان داده شده‌اند (نامگذاری نواریها با توجه به محورهای نامگذاری شده در شکل (۲-الف) صورت گرفته است). همچنین نیروی برشی و لنگر خمشی حداکثر ایجاد شده در کل نواریهای کلاهک متوسط‌گیری شده و تغییرات مقدار متوسط حاصل و نیز تغییرات ماکزیمم نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در بین کل نواریها، در این شکل نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حداکثر لنگر خمشی حاصل از نیروی زلزله در هر نوار، در دو انتهای آن (در مجاورت شمعها یا ستونها) ایجاد گردیده است. موارد مذکور، در واقع از جمله اثرات مثبت انعطاف-

n باشد، خواهیم داشت:

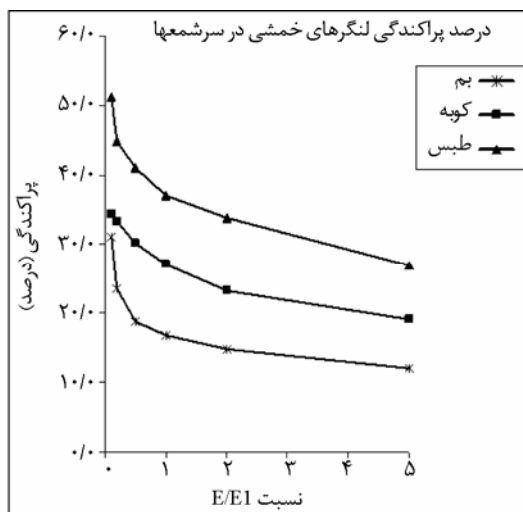
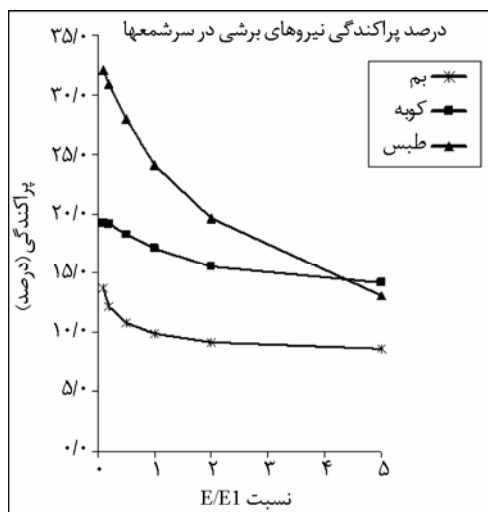
$$\text{درصد پراکندگی} = \sqrt{\sum \frac{(\bar{f} - f_i)^2}{nf^2}} * 100\%$$

۳-۲- اثر جرم کلاهک

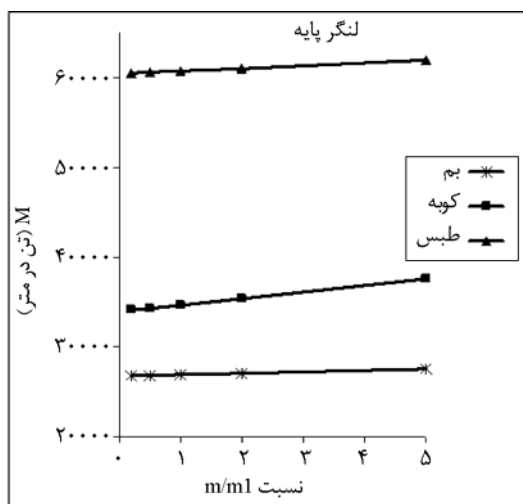
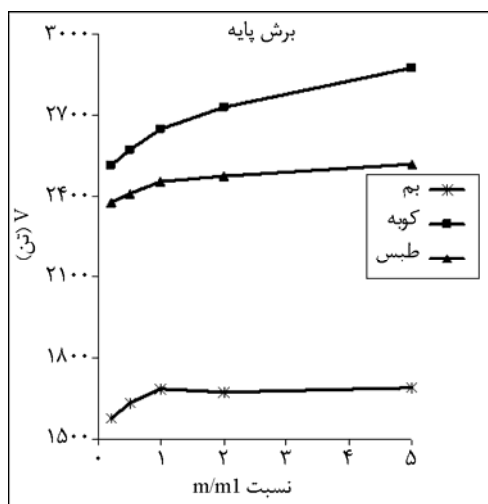
به منظور بررسی اثرات جرم کلاهک شمع در پاسخ لرزه-ای سیستم خاک-شمع-سازه، مقادیر ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ برای نسبت چگالی فرضی بتن کلاهک (m) به چگالی واقعی بتن کلاهک ($m1$)، در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش جرم کلاهک، مجموع لنگرهای خمشی در پایه ساختمان تغییر چندانی نمی‌نماید، لیکن نیروهای برشی مقداری افزایش خواهند یافت. در شکل (۱۰)، می‌توان روند این تغییرات را مشاهده نمود. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش جرم، آهنگ افزایش نیروهای برشی در پایه ساختمان به مرور کاهش می‌یابد.

شکل (۹) چگونگی تغییرات میزان پراکندگی لنگرها و نیروهای برشی در سرشمعها را نسبت به سختی کلاهک نشان می‌دهد.

مسئله دیگری که در بررسی پاسخ سیستم حائز اهمیت است، تغییر مکان می‌باشد. با بررسی تغییرات مقدار تغییر مکان در سرشمعها و بام نسبت به سختی کلاهک، مشخص شد که با انعطاف پذیر شدن کلاهک، میزان تغییر مکانها در سازه کمی افزایش یافته که البته اثرات آن در تغییر مکان طبقات بالاتر، کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به نتایج حاصله، می‌توان به اثرات



شکل (۹): روند تغییرات درصد پراکندگی نیروی برشی و لنگر خمشی سرشمعها از مقدار متوسط، نسبت به سختی‌های مختلف کلاهک.



شکل (۱۰): تغییرات برش سرشمعها و لنگر خمشی پایه، نسبت به جرم کلاهک.

انتخاب ابعاد نوارها (شامل عرض و ارتفاع نوار) می‌باشد. ابعاد نوارها بایستی به گونه‌ای انتخاب گردد، که علاوه بر پاسخگو بودن نسبت به بارهای وارده، از لحاظ اقتصادی نیز بهینه باشند. واضح است که با تغییر ابعاد نوارها، سختی و جرم کلاهدک نیز تغییر خواهد نمود. از طرفی به طوری که ملاحظه گردید، افزایش انعطاف‌پذیری کلاهدک و همچنین کاهش جرم آن، می‌تواند نیروهای ایجاد شده در سرشمعها و همچنین پایه ساختمان را کاهش دهد. بنابراین در وهله نخست ممکن است این طور به نظر برسد که با کاهش ابعاد کلاهدکها، می‌توان به پاسخ بهتری دست یافت. لیکن در تعیین ابعاد کلاهدکها بایستی به سه نکته مهم توجه داشت:

۱. با کاهش ابعاد کلاهدکها و در نتیجه کاهش سختی و جرم آنها، همان طور که در بخشهای ۱-۳ و ۲-۳ مشاهده گردید، بر پراکندگی نیروهای وارده به سرشمعها و همچنین پراکندگی نیروهای ایجاد شده در نوارها افزوده گردیده، لذا کلاهدک وظیفه توزیع مناسب نیروهای وارده بین سرشمعها را به خوبی انجام نمی‌دهد.
۲. با کاهش ابعاد نوارها، ظرفیت باربری آنها نیز کاهش یافته و ممکن است، علی‌رغم کاهش نیروهای وارده به نوارها در نتیجه کاهش سختی کلاهدک، تحمل نیروهای وارده را نداشته باشند.
۳. همان طور که در قسمت قبل ملاحظه گردید،

افزایش نیروها در پایه ساختمان به دنبال افزایش جرم کلاهدک را می‌توان ناشی از تغییر حرکات وارده به پایه ساختمان به دلیل اثرات اینرسیال کلاهدک دانست.

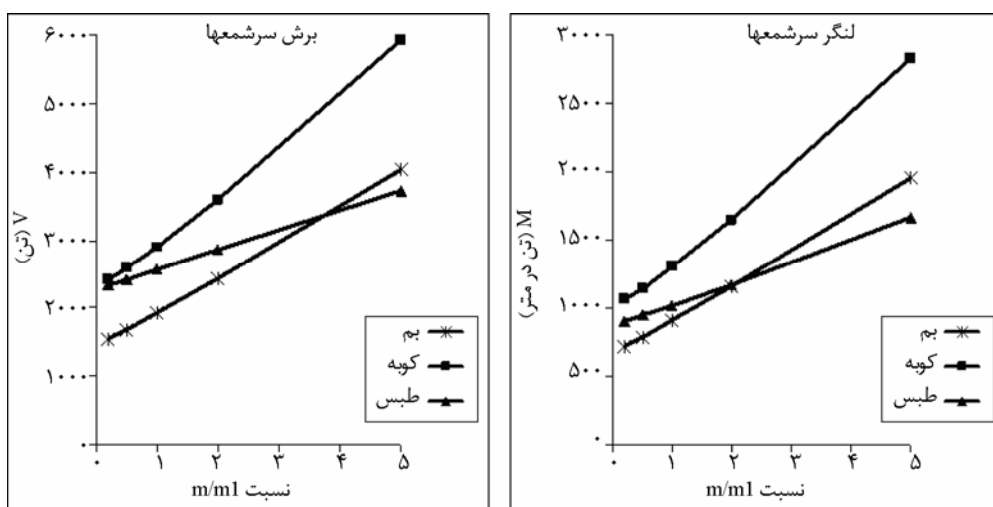
همچنین شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در سیستم مورد بررسی، با افزایش جرم کلاهدک، مجموع نیروهای برشی و لنگرهای خمشی سرشمعها به صورت خطی افزایش یافته‌اند. البته تعمیم این نتایج برای سیستم‌های دیگر نیاز به بررسیهای بیشتری دارد.

در خصوص تغییرمکان سازه نیز مشاهده گردید که برخلاف سختی، با افزایش جرم کلاهدک میزان تغییرمکانها در سیستم کمی افزایش می‌یابد که البته اثرات آن در تغییرمکان طبقات بالاتر، کمتر می‌گردد. ضمن اینکه تغییرات تقریباً خطی می‌باشد.

۳-۳- اثر شکل و ابعاد کلاهدک

همان طور که گفته شد، هنگامی که کلاهدکهای گسترده در معرض بارهای استاتیکی یا دینامیکی قرار می‌گیرند، توزیع بار وارده بر روی کلاهدک معمولاً در نوارهایی در بین سرشمعها صورت می‌گیرد، بنابراین می‌توان از کلاهدکهای نواری استفاده نمود. این نوع کلاهدک علاوه بر کاهش حجم بتن‌ریزی، به دلیل انعطاف‌پذیر بودن نسبی آن می‌تواند لنگر و نیروی برشی وارده به سرشمعها و پایه ساختمان را کاهش دهد.

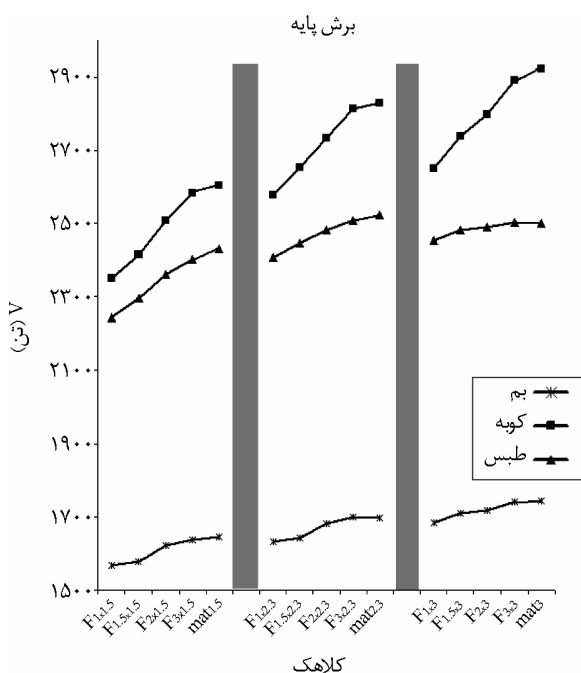
مسئله مهمی که در مورد این نوع کلاهدک مطرح است،



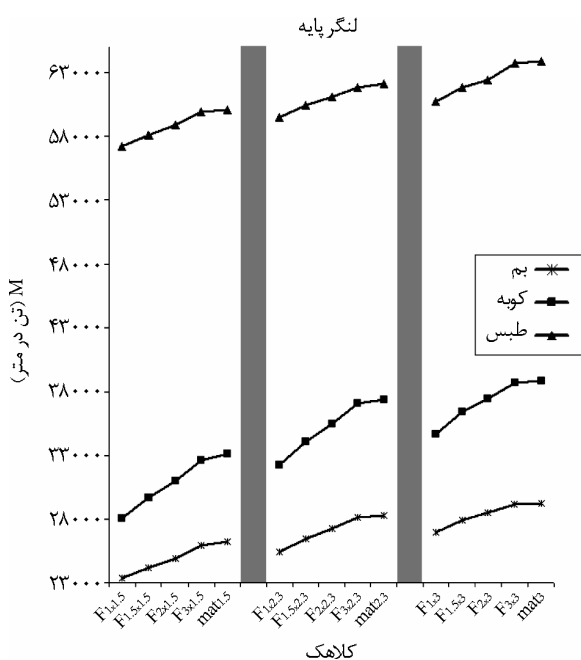
شکل (۱۱): تغییرات برش سرشمعها و لنگر خمشی سرشمعها، نسبت به جرم کلاهدک.

با افزایش ضخامت کلاهک، مجموع نیروهای وارده به سرشمعها افزایش می‌یابد.

همچنین با مقایسه نتایج مربوط به پایه ساختمان و سرشمعها، می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد کلاهک، میزان افزایش نیروها در سرشمعها بیش از پایه ساختمان بوده و به عبارت دیگر، اثرات کلاهک بر روی سرشمعها بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۲): مقایسه برش پایه حاصل از سه شتابنگاشت برای کلاهکهای با ابعاد مختلف.



شکل (۱۳): مقایسه لنگر خمشی پایه حاصل از سه شتابنگاشت برای کلاهکهای با ابعاد مختلف.

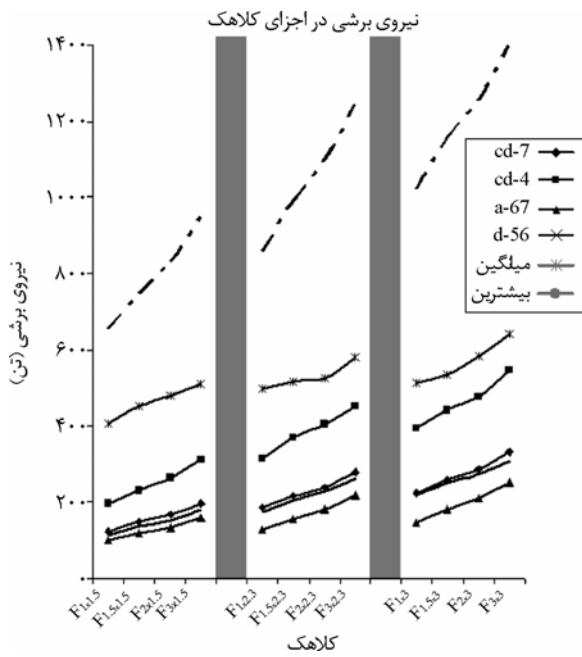
کاهش سختی کلاهک می‌تواند منجر به افزایش تغییرمکان در سیستم گردد. لذا در کاهش ابعاد کلاهک، بایستی مسأله تغییرمکان که از محدودیتهای مربوط به ساختمان است، مورد توجه قرار گیرد.

بنابراین به منظور بررسی اثراتی که ابعاد نوارها بر روی پاسخ لرزه‌ای سیستم می‌گذارند، همچنین مقایسه عملکرد این نوع کلاهک با کلاهک گسترده، ۱۵ کلاهک نواری و گسترده، با ابعاد مختلف در نظر گرفته شد که این ۱۵ کلاهک در قسمت ۲-۱ و جدول (۳) معرفی گردیده‌اند. به این صورت که ۱۵ سیستم خاک-شمع-سازه با کلاهکهای مختلف، در معرض سه شتابنگاشت بم، کوبه و طپس قرار داده شده و تحلیل گردیدند. سپس پاسخ سیستم برای این ۱۵ مدل از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در ادامه این قسمت آورده شده است.

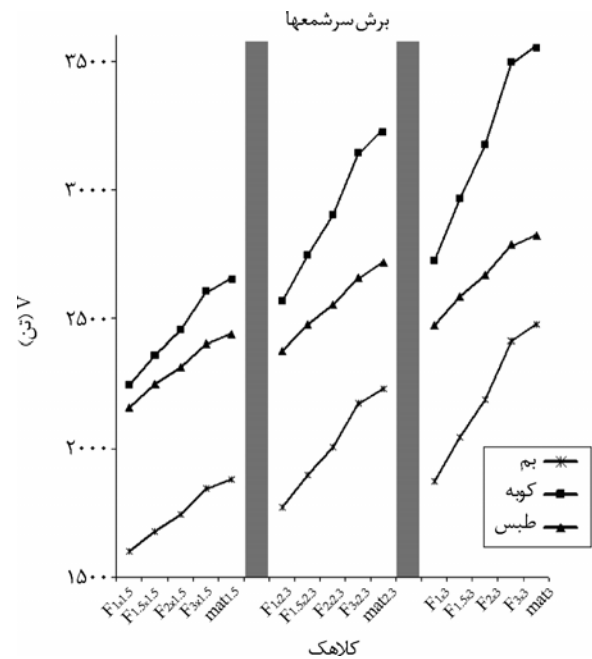
لازم به ذکر است که به منظور مقایسه راحتتر، کلیه منحنی‌هایی که در این قسمت به منظور بررسی و مقایسه پاسخ سیستم برای ۱۵ کلاهک مذکور ارائه شده‌اند، به سه قسمت تقسیم گردیده‌اند که هر قسمت شامل ۵ کلاهک با ارتفاع (ضخامت) یکسان می‌باشد.

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، مجموع نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در پایه ساختمان برای ۱۵ کلاهک مورد نظر مقایسه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عرض نوارها و به عبارتی با حرکت از حالت کلاهک نواری به سمت کلاهک گسترده، بر مقادیر این نیروها افزوده می‌گردد. همچنین با افزایش ضخامت کلاهک، این مقادیر افزایش می‌یابند. البته در نمودارهای حاضر به نظر می‌رسد که کلاهک گسترده، مقداری از مسیر نمودارها منحرف گردیده است. این امر ممکن است ناشی از تفاوت در نحوه مدلسازی کلاهک گسترده و کلاهک نواری باشد. زیرا در مدلسازی کلاهکهای گسترده از المان پوسته (*shell*) استفاده گردیده، در حالی که کلاهکهای نواری توسط المانهای قاب (*frame*) مدل گردیده‌اند.

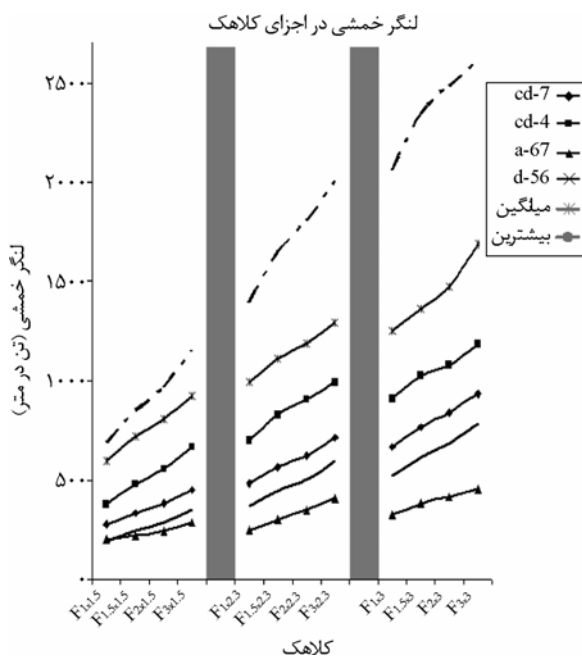
در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، مجموع نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در سرشمعها، برای کلاهکهای مختلف مقایسه گردیده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش عرض نوارها و حرکت از حالت نواری به سمت گسترده و



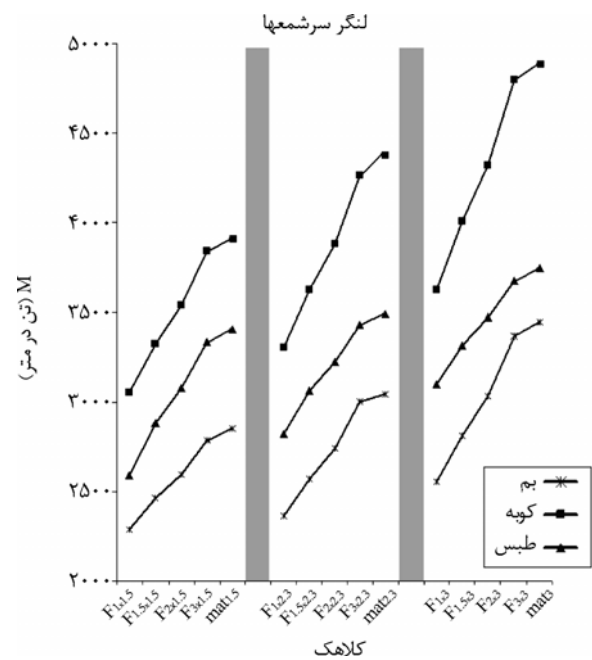
شکل (۱۶): تغییرات نیروی برشی در تیرهای کلاهک، نسبت به ابعاد کلاهک (حاصل از شتابنگاشت طیس).



شکل (۱۴): مقایسه برش سرشمعه‌ها حاصل از سه شتابنگاشت برای کلاهک‌های با ابعاد مختلف.



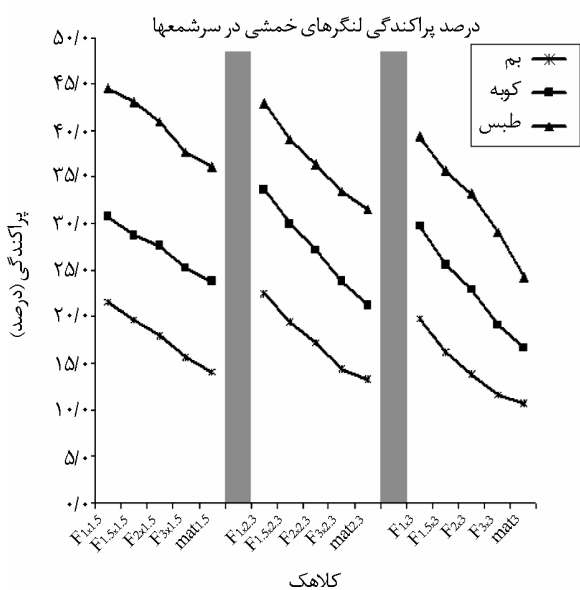
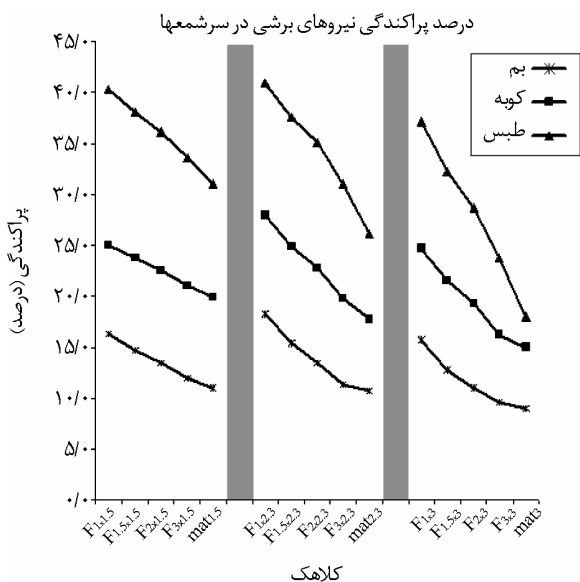
شکل (۱۷): تغییرات لنگر خمشی در تیرهای کلاهک، نسبت به ابعاد کلاهک (حاصل از شتابنگاشت طیس).



شکل (۱۵): مقایسه لنگر خمشی سرشمعه‌ها حاصل از سه شتابنگاشت برای کلاهک‌های با ابعاد مختلف

حاصل و تغییرات ماکزیمم نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در بین کل نوارها، در این دو شکل نشان داده شده است. لازم به توضیح است که حداکثر لنگر خمشی حاصل از نیروی زلزله در هر نوار، در دو انتهای آن (در مجاورت شمعه‌ها یا ستونها) ایجاد گردیده است. نتایج بیانگر

در شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، به عنوان نمونه، تغییرات حداکثر نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در نوارهای $cd-7$ ، $cd-4$ ، $a-67$ و $a-56$ نشان داده شده‌اند. همچنین نیروی برشی و لنگر خمشی حداکثر ایجاد شده در کل نوارهای کلاهک متوسط‌گیری شده و تغییرات مقدار متوسط



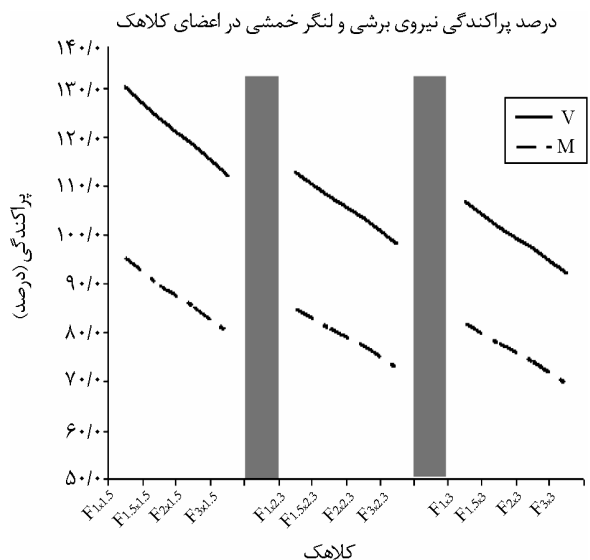
شکل (۱۹): تغییرات درصد پراکندگی نیروی برشی و لنگر خمشی در سرشمعها، نسبت به ابعاد کلاهک.

۴- نتایج

در این مقاله، اثرات انعطاف‌پذیری و جرم کلاهک شمع بر روی پاسخ لرزه‌ای سیستم خاک- شمع- سازه مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با تغییر جرم و سختی مصالح کلاهک، اثرات جرم و انعطاف‌پذیری به طور جداگانه بررسی گردید و سپس با استفاده از ۱۲ کلاهک نواری و سه کلاهک گسترده، ضمن بررسی کارایی کلاهکهای نواری در مقایسه با کلاهکهای گسترده، اثرات توأم جرم و انعطاف‌پذیری کلاهک بررسی گردید. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت خلاصه در قالب موارد ذیل طبقه‌بندی نمود:

این مطلب است که با افزایش عرض و همچنین ارتفاع کلاهک، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی به وجود آمده در قسمتهای مختلف کلاهک، افزایش خواهند یافت. با توجه به بخشهای ۱-۳ و ۲-۳ می‌توان این مسأله را ناشی از افزایش سختی کلاهک دانست.

در شکل (۱۸)، چگونگی تغییرات میزان پراکندگی لنگرها و نیروهای برشی در کلاهک، نسبت به ابعاد کلاهک نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۹) چگونگی تغییرات میزان پراکندگی لنگرها و نیروهای برشی در سرشمعها را نسبت به ابعاد کلاهک نشان می‌دهد. همان طور که در این دو شکل نشان داده شده است، افزایش ابعاد کلاهک (با توجه به افزایش سختی کلاهک)، موجب کاهش پراکندگی نیروهای به وجود آمده در سرشمعها و همچنین تیرهای کلاهک می‌گردد و لذا در انتخاب ابعاد کلاهک بایستی به آن توجه گردد. البته یکی از مزایای استفاده از کلاهک نواری این است که با توجه به میزان نیروهای ایجاد شده در قسمتهای مختلف کلاهک، می‌توان از نوارهای با ابعاد متفاوت در قسمتهای مختلف کلاهک، استفاده نموده و تا حدودی مشکل افزایش میزان پراکندگی نیروهای وارده به قسمتهای مختلف کلاهک را مرتفع نمود.



شکل (۱۸): مقایسه پراکندگی نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در تیرهای کلاهک، نسبت به ابعاد کلاهک (حاصل از شتابنگاشت طیس).

نیروهای ایجاد شده در کلاهک، می‌توان با تغییر ابعاد نوارها در قسمت‌های مختلف (متناسب با نیروهای وارده) این مشکل را برطرف نمود. دوم اینکه با کاهش ابعاد نوارها، ظرفیت باربری آنها نیز کاهش یافته و ممکن است علی‌رغم کاهش نیروهای وارده به نوارها، تحمل نیروهای وارده را نداشته باشند. لذا با توجه به اینکه ظرفیت باربری نوارها با مجذور ارتفاع نوارها رابطه مستقیم دارد، به نظر می‌رسد که در انتخاب مناسبترین مقطع می‌توان از عرض نوارها کاسته و در مقابل بر ارتفاع آنها افزود.

۵- مراجع

1. Matsui, T. and Oda, K. (1996). Foundation damage of structures, Soils and Foundations Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken Nambu Earthquake, *JSSMFE*, **36**(1), 189-200
2. Huang, Y., Zhang, F., Yashima, A., Sawada, K., Ye, G.-L., and Kubota, N. (2004) Three-dimensional numerical simulation of pile-soil seismic interaction in saturated deposits with liquefiable sand and soft clay, Department of Civil Engineering, Gifu University, Gifu, 501-1193, Japan.
3. Meymand, P.J. (1998). Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay, University of California, Berkeley, A Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.
4. Won, J., Ahn, S.-Y., Jeong, S., Lee, J., and Jang, S.-Y. (2006). Nonlinear three-dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility, *Elsevier Science Ltd -Computers and Geotechnics*, **33**. 355-370.
5. Zhang, H.H. and Small, J.C. (1999). Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads, *Elsevier Science Ltd-Computers and Geotechnics*, **26**, 1-21.

۱. می‌توان ضخامت کلاهک را در جایی متمرکز نمود که بیشترین بازدهی را در عین عملکرد صحیح خمشی و برشی داشته باشد. به این منظور می‌توان از نوعی کلاهک به شکل نواری استفاده نمود.

۲. افزایش انعطاف پذیری کلاهک منجر به کاهش نیروهای وارده به سرشمعها و همچنین پایه ساختمان، کاهش نیروهای برشی و لنگرهای خمشی بوجود آمده در کلاهک، افزایش تغییر مکانها در سازه، و افزایش پراکندگی نیروهای ایجاد شده در شمعها و اجزای کلاهک، خواهد گردید.

۳. کاهش جرم کلاهک تأثیر قابل توجهی بر لنگرهای خمشی در پایه ساختمان نداشته، لذا منجر به کاهش نیروهای برشی در پایه ساختمان به دلیل اثرات اینرسیال کلاهک بر روی بار وارده، کاهش نیروهای برشی و لنگرهای خمشی سرشمعها، و کاهش تغییر مکان در قسمت سرشمعها، خواهد گردید.

۴. به طور کلی استفاده از کلاهکهای نواری علاوه بر کاهش حجم بتن ریزی، عملکرد لرزه‌ای سیستم را نیز نسبت به کلاهکهای گسترده بهبود می‌بخشد. از طرف دیگر در این نوع کلاهکها، گسیختگی برشی از نوع پانچینگ نبوده و نوارها همانند تیرهای عمیق عمل خواهند نمود. لذا می‌توان برای افزایش مقاومت برشی کلاهک، از آرماتورهای برشی نیز استفاده نمود.

۵. با کاهش ابعاد نوارها، به دلیل کاهش سختی و جرم کلاهک، نیروهای وارده به سرشمعها و پایه ساختمان و همچنین نیروهای ایجاد شده در نوارها کاهش می‌یابد. لذا علاوه بر بهبود عملکرد سازه، میزان بتن و همچنین آرماتور مصرفی در کلاهک نیز کاهش می‌یابد. البته کاهش ابعاد کلاهکها دارای دو محدودیت است. اول اینکه بر پراکندگی نیروهای وارده به سرشمعها و همچنین نیروهای ایجاد شده در نوارها افزوده گردیده، و کلاهک وظیفه توزیع مناسب نیروهای وارده بین سرشمعها را به خوبی انجام نمی‌دهد. البته در مورد پراکندگی

10. El. Nagger, M.H. and Bently, K.J. (2000). Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic p-y curves, *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), 1166-1183.
11. American Petroleum Institute (2000). API Recommend Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD), Twenty-first edition.
12. Parker, F. and Reese, L.C. (1970). Experimental and analytical studies of behavior of single pile under lateral and axial loading, Texas University, Austin, Texas, USA.
13. Jayram Ramachandran (2005). Analysis of pile foundations under seismic loading, CBE Institute: Final Report.
6. نصراللهی، نسیم (۱۳۸۵). بررسی اندرکنش شمع- خاک تحت بارهای لرزه‌ای و هارمونیک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
7. Trochianis, A., Bielak, J., and Christiano, P. (1988). A three-dimensional nonlinear study of piles leading to the development of a simplified model, Rpt. R-88-176, Dept. of Civil Eng., Carnegie Inst. of Technology.
8. Jayram Ramachandran (2005). Analysis of pile foundations under seismic loading, CBE Institute, Final Report.
9. Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay, *Proc. 2nd Offshore Technology Conf.*, OTC 1204, Houston, **1**, 577-594.