فصل اول: دیباچه

۱-۱- کلیات

شمع‌ها یک عنصر ساختمانی لاغر و معمولا طویل هستند که از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب می‌باشند که برای انتقال بارهای ساختمانی به خاک‌های واقع در اعماق بیشتر زمانی که ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی مناسب نباشد مورد استفاده قرار می‌گیرند و بار روسازه را به اعماق بیشتر و لایه‌های مقاوم‌تر منتقل می‌کند. بارهای ساختمانی شامل بارهای محوری، بارهای جانبی و لنگرها می‌باشد. علیرغم مخارج بیشتر نسبت به شالوده‌های سطحی، در عمل موارد متعددی وجود دارد که برای ایمنی ساختمان در مقابل نشست و عوامل دیگر، از شالوده‌های شمعی استفاده می‌شود[۱].

شمع‌ها از دو طریق بار رو سازه را به لایه‌های مقاوم منتقل می‌کند:

۱- مقاومت برشی که در طول سطح جانبی آن به علت اصطکاک شمع و خاک بوجود می‌آید.

۲- مقاومت نوک، به علت باربری شمع در نوک آن

که هر کدام از این دو روش حین زلزله و تغییر در وضعیت شمع و خاک دستخوش تغییر می‌شود و می‌تواند رفتار شمع و اندرکنش آن با خاک را تحت تاثیر قرار دهد.

بدون اغراق می‌توان گفت شمع‌ها در اکثر سازه‌ها با بار سنگین همچون ساختمان‌های چند طبقه و برج‌ها، پل‌ها، سکوهای نفتی بنادر و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مناطق لرزه‌خیز که خاک ماسه‌ای شل تا نیمه متراکم دارد به دلیل آن‌که خاک‌های ماسه‌ای نیمه شل توانایی تحمل بار از پی‌های گسترده را ندارد، سازه‌ها اغلب بر روی شمع ساخته می‌شود. اگر خاک ماسه‌ای به علت وجود سفره‌های آب زیرزمینی اشباع باشد، حین زلزله و تکان‌های شدید، به علت افزایش فشار آب حفره‌ای، سختی و مقاومت خود را از دست می‌دهد و ماسه مانند یک سیال غلیظ رفتار می‌کند. این پدیده روانگرایی نام دارد و اصلی‌ترین دلیل خرابی فونداسیون‌های شمعی در زلزله‌های اخیر گزارش شده است از جمله می‌توان به زلزله‌های ۱۹۶۴ نیگاتا ژاپن، ۱۹۶۴ آلاسکا، ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، ۱۹۹۹ کوکایلی (ازمیت) ترکیه و ۲۰۰۱ بووجی هند اشاره نمود. با توجه به سازوکارهای مختلف خرابی شمع در خاک‌های مستعد روانگرایی حین زلزله مطالعات گسترده و جامعی توسط مهندسین ژئوتکنیک انجام شد.

۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

سازه‌های متکی بر شمع هنوز هم بعد از زلزله دچار خرابی و نقص در کارایی می‌شوند، با وجود اینکه ضرایب اطمینان بالایی برای ظرفیت محوری، برشی و خمشی در مقابل نیروهای محوری و جانبی در طراحی آن‌ها استفاده شده است. با توجه به مشاهدات محلی و بررسی شمع‌های آسیب دیده حین زلزله، مشاهده شد شمع‌ها با تشکیل مفصل پلاستیک دچار خرابی می‌شوند. خرابی بر پایه سازوکار خمش علت اصلی گسیختگی فونداسیون‌های شمعی به حساب می‌آید. به همین دلیل اغلب آیین‌نامه‌های موجود در طراحی لرزه‌ای شمع‌ها از جمله Euro Code 8، NEHRP 2000، JRA 1996 و IS 1893 براساس معیار خمشی است و تشکیل مفصل پلاستیک به علت نیروی‌های جانبی ناشی از اینرسی و حرکت شیب (گسترش جانبی) را عامل اصلی خرابی در نظر می‌گیرند[۵، ۶، ۱۸ و ۳۹].

علیرغم در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا برای بار اعمالی و تنش‌های مجاز مصالح جهت جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک، ولی باز در اکثر زلزله‌ها و در مناطق مستعد روانگرایی، گسیختگی شمع به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک (که با رسیدن مقطع به ممان پلاستیک خود تشکیل می‌شود) رخ می‌دهد. نکته دیگری که می‌توان از بررسی

موارد عینی به آن پی برد آن است که این نوع خرابی هم در کشورهای در حال توسعه مانند هند و هم در کشورهای توسعه یافته‌ای همچون ژاپن که دارای کیفیت بسیار بالا در طراحی، ساخت و نگهداری سازه است ملاحظه شده است. در واقع یا مفاهیم استنباط شده از رفتار لرزه‌ای شمع نادرست است و یا آیین‌نامه‌های تدوین شده اثر سازوکار مهمی را در نظر نمی‌گیرند و نیروهای لرزه‌ای را بسیار ناچیز و غیرواقعی تخمین می‌زنند، چون روش طراحی با سازوکار فیزیکی که بر شکل خرابی‌ها حاکم است سازگاری ندارد.

۱-۳- اهداف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش بررسی مکانیزم‌های مختلف خرابی شمع در خاک روانگرا شده حین زلزله و جامعیت آیین‌نامه‌های موجود برای طراحی لرزه‌ای شمع‌ها و تاثیر پارامترهای مختلف شمع، خاک و زلزله می‌باشد. همچنین مکانیزم مهمی که ممکن است در خرابی شمع‌ها نقش بسزایی را داشته باشد و آیین‌نامه‌های طراحی آن را در نظر نمی‌گیرند مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش تنش موثر و انتظار وقوع تغییرشکل‌های بزرگ و مدل‌سازی پدیده روانگرایی که معدود نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی این قابلیت را دارا می‌باشد از نرم‌افزار تفاضلات محدود $FLAC^{2D}$ به صورت تقارن محوری استفاده گردید تا تأثیر دانسیته نسبی خاک، فرکانس غالب زلزله، قطر و نوع شمع و شتاب حداکثر زلزله بر روی پاسخ شمع و خاک و دو مکانیزم مهم خرابی شمع‌ها یعنی گسیختگی خمشی و ناپایداری کمانشی و همچنین رفتار برشی مقاطع مورد بررسی قرار بگیرد.

۱-۴- ساختار پژوهش

در این پایان‌نامه نیروهای اثرکننده بر شمع حین زلزله و مکانیزم‌های مختلف خرابی شمع در خاک روانگرا شده حین زلزله بطور خلاصه بررسی می‌شود. تمرکز اصلی آیین نامه‌های طراحی لرزه‌ای شمع معرفی می‌شود و دلیل ناکافی بودن آن در طراحی شمع، با توجه به آزمایشات سانتریفیوژ و بررسی چندین نمونه عینی اثبات می‌شود و نادیده گرفتن

عامل مهمی که می‌تواند بعضی از موارد خرابی شمع‌ها را توجیه کند بررسی می‌شود. در ادامه نرم‌افزار FLAC ^{2D}، مبانی و قابلیت‌های آن توضیح داده می‌شود. اعتبار مدل‌سازی توسط این نرم‌افزار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی آزمایش سانتریفیوژ که توسط ویلسون و همکاران در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه کالیفرنیا انجام گردید سنجیده می‌شود وسپس نحوه و روند مدل‌سازی جهت انجام مطالعه عددی به طور کامل و جامع توضیح داده می‌شود. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی بر روی دو نوع شمع بتنی و فولادی با قطرهای مختلف در سه خاک با دانسیته نسبی ۴۰٪، ۵۵٪ و۸۰٪ تحت پنج زلزله با فرکانس‌های غالب مختلف که به سه شتاب بیشینه مقیاس گردیدند در دو بخش کمانش و خمش به صورت نمودار و جدول ارائه می‌شود و در انتها تاثیر پارامترهای مختلف شمع، خاک و زلزله بر روی پاسخ دینامیکی خمش، کمانش و برش شمع و اثر شرایط تکیه‌گاهی در سر و نوک شمع به صورت کمی و کیفی ارائه می‌شود.

فصل دوم: مروری بر متون فنی

۲-۱- مقدمه

شمع یک عنصر ساختمانی لاغر از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب می‌باشد که برای انتقال بارهای ساختمانی به خاک‌های واقع در اعماق بیشتر زمانی که ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی مناسب نباشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. بارهای ساختمانی شامل بارهای محوری، بارهای جانبی و لنگرهای خمشی می‌باشد[۱]. همچنین در مناطق لرزه‌خیز با خاک ماسه‌ای شل تا نیمه متراکم به علت آن‌که این خاک‌های ماسه‌ای تحمل بار از پی‌های گسترده را ندارد از شمع که نوعی از شالوده‌های عمیق است استفاده می‌شود. علیرغم مخارج بیشتر نسبت به شالوده‌های سطحی، در عمل موارد متعددی وجود دارد که برای ایمنی ساختمان در مقابل نشست و عوامل دیگر، از شالوده‌های شمعی استفاده می‌شود. در زیر به طور خلاصه شرایطی که استفاده از شالوده‌های شمعی را ایجاب می‌کند، شرح داده می‌شود[۱و۲].

۱) خاک نزدیک سطح زمین ظرفیت باربری کافی برای تحمل بارهای ساختمانی را نداشته باشد یا خاک دارای قابلیت فشردگی زیاد باشد.

۲) نشست برآورد شده خاک از حدود مجاز تجاوز کند.

۳) حفاری لازم جهت احداث یک پی کم عمق روی یک لایه خاک سفت، مشکل بوده یا گران تمام شود.

۴) خاک موجود در محل، خاک قابل تورم[۱] یا فروریزشی[۲] (رمبنده) باشد. خاک قابل تورم در اثر کاهش یا افزایش میزان رطوبت، تورم یا کاهش حجم پیدا می‌کند. فشار تورم چنین خاک‌هایی ممکن است بسیار زیاد باشد واستفاده از شالوده‌های سطحی ممکن است صدمات جدی به سازه وارد کند.

۵) شالوده تحت اثر نیروی برکنش[۳] یا بالا برنده نظیر خطوط انتقال برق، اسکله‌ها و شالوده‌های گسترده در زیر تراز آب زیرزمینی، قرار داشته باشد.

۶) به خاطر وجود مسئله آب‌شستگی و فرسایش در محل پایه‌های پل همچنین در سازه‌های دریایی.

بر حسب شرایط تحت‌الارضی، سطح آب زیرزمینی و نوع باری که باید حمل شود، از انواع مختلف شمع در کارهای ساختمانی استفاده می‌شود. بدون اغراق می‌توان گفت شمع‌ها در اکثر سازه‌ها با بارهای سنگین مثل برج‌ها، پل‌ها، سکوهای نفتی و ... استفاده می‌شود[۱۴].

۲-۲- روانگرایی

پدیده تغییر رفتار ماسه ازحالت جامد به حالت مایع در نخستین گام‌های گسترش دانش مکانیک خاک شناخته شد. هیزن برای اولین بار لغت روانگرایی را در سال ۱۹۲۰ به منظور توضیح شکست سد کالاوراس کالیفرنیا به‌کار برد. پدیده روانگرایی از آن زمان به بعد توسط بسیاری از محققین مهندسی ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. هرچند معرفی این عبارت توسط هیزن برای توضیح شکست یک سد خاکی تحت بارهای وزنی (استاتیکی) بکار برده شد، اما بعدها وقوع این پدیده برای بارهای دینامیکی نیز مورد استفاده قرار گرفت.

وقوع پدیده روانگرایی برای بارهای غیر لرزه‌ای به وسیله تعدادی از محققین مثل کاساگرانده (۱۹۳۶)، کاسترو (۱۹۶۹)، کریمر و سید (۱۹۸۸) و اولسون[۴] و استارک (۲۰۰۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. ترزاقی و پک

---

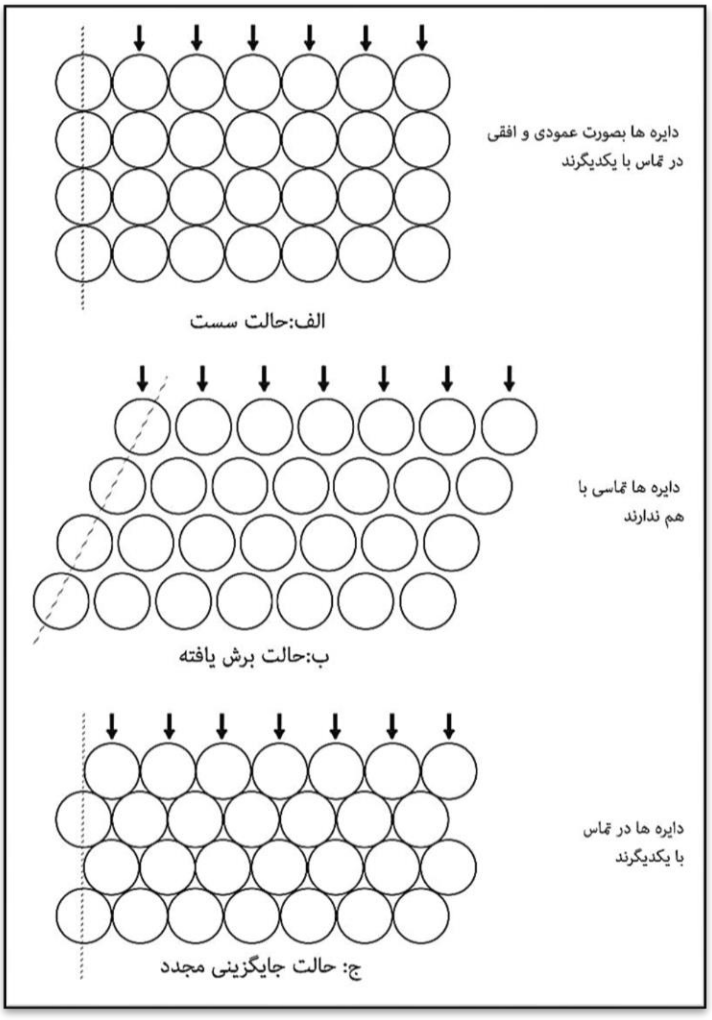
۱ Expansive
۲ collapsible
۳ uplift
٤ Olson

(۱۹۴۸) برای نشان دادن تغییر حالت ناگهانی توده‌های ماسه‌ای شل در اثر دست‌خوردگی و جریان یافتن آن‌ها مانند سیال از واژه روانگرایی آنی استفاده کردند. پیش از آن کاساگرانده (۱۹۳۶) پدیده روانگرایی ماسه و اثرات آن را شناساند. وی از فرضیه تخلخل بحرانی برای نشان دادن شرایطی که موجب وقوع روانگرایی می‌گردد استفاده نمود. کاساگرانده توضیح داد که ماسه متراکم وقتی تحت برش واقع می‌شود گرایش به انبساط دارد؛ در حالیکه ماسه شل تحت همان شرایط گرایش به کاهش حجم دارد. بنابراین هر برای هر ماسه تخلخلی وجود دارد که وقتی ماسه در آن تخلخل تحت برش قرار می‌گیرد، حجمش تغییر نمی‌کند و در نتیجه تحت شرایط زهکشی نشده هیچ تغییری در فشار آب منفذی به وجود نمی‌آید و این تخلخل به نام تخلخل بحرانی خوانده می‌شود. بنابراین وی نتیجه گرفت ماسه با تخلخل بزرگ‌تر از تخلخل بحرانی وقتی تحت برش قرار می‌گیرد تمایل به کاهش حجم خواهد داشت و در شرایط زهکشی نشده که امکان تغییر حجم وجود ندارد موجب افزایش فشار آب منفذی می‌شود. این افزایش ممکن است آنقدر زیاد شود که منجر به وقوع روانگرایی شود. در مقابل ماسه با نسبت تخلخل کوچک‌تر از تخلخل بحرانی وقتی تحت برش قرار می‌گیرد تمایل به انبساط خواهد داشت و این امر در شرایط زهکشی نشده موجب کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه افزایش تنش موثر می‌شود، بنابراین مقاومت و پایداری ماسه افزایش می‌یابد[۴]. شکستگی در سازه‌های احداث شده بر روی ماسه‌های با تخلخل کمتر از تخلخل بحرانی و به عکس رفتار قابل‌قبول سازه‌های متکی بر ماسه‌ها با تخلخل بیش‌تر از تخلخل بحرانی نشان داد که فرضیه تخلخل بحرانی برای ارزیابی کمی روانگرایی توده های ماسه‌ای بر اثر بارگذاری ارتعاشی یا زلزله کافی نیست. نادرستی فرضیه تخلخل بحرانی در شرایط بارگذاری ارتعاشی مهندسین را واداشت تا معیارهای دیگری برای این امر در نظر بگیرند.

وقوع زلزله ۷/۵ ریشتری ۱۹۶۴ نیگاتا در ژاپن با خسارتی بیش از یک میلیارد دلار که موجب کج شدن بعضی از ساختمان‌ها تا میزان ۳۰ درجه نسبت به قائم شد و وقوع زلزله زیان‌بار آلاسکا در همان سال با مقیاس ۹/۲ درجه در مقیاس ریشتر که منجر به خرابی بیش از ۲۰۰ پل و زمین لغزش‌های عظیم گشت و همچنین شکست سد خاکی سن‌فرناندو پایینی بر اثر زلزله ۱۹۷۱ به دلیل وقوع روانگرایی در قسمت پوسته بالادست این سد، از اتفاقاتی بودند که موجب تلاش بیشتر محققین در جهت شناخت بیشتر پدیده روانگرایی شدند. بعضی از خرابی‌های ناشی از

زلزله، به دلیل روانگرایی در خاک زیر پی سازه‌ها ممکن است ایجاد شود. خرابی فاجعه‌آمیز سد شفیلد طی زلزله سانتاباربارا در سال ۱۹۲۵ یک مثال قدیمی این نوع خرابی می‌باشد (سید ۱۹۶۸). در ایران نیز که بر اثر زلزله ۱۳۶۹هجری شمسی، بخش گسترده‌ای از ناحیه شمال و شمال غرب دچار آسیب‌های شدید شدند، آثار روانگرایی در بخش وسیعی از دشت گیلان مشاهده گردید. شایان ذکر است که علاوه بر زلزله، عوامل دیگری که از نظر ماهیت بارگذاری دینامیکی شبیه زلزله می‌باشند مانند امواج دریا، بارهای ضربه‌ای مداوم ناشی از ترافیک و یا تنش ناشی از انفجار نیز می‌تواند باعث وقوع این پدیده شوند[۳].

۲-۲- ۱- مکانیزم روانگرایی



شکل (۲-۱): شکل شماتیکی مکانیزم روانگرایی[۴]

در مناطق لرزه‌خیز با لایه‌های ماسه‌ای شل تا نیمه متراکم اشباع، از شالوده‌های شمعی استفاده می‌شود. یک لایه ماسه اشباع شل هنگامی که تحت اثر ارتعاش قرار می‌گیرد ابتدا به علت انتشار موج برشی از بستر سنگی تغییرشکل می‌دهد و تمایل به تراکم و کاهش حجم دارد. به دلیل کوتاه بودن زمان اثر تنش دوره‌ای (سیکلیک) در مقایسه با زمان مورد نیاز برای زهکشی شدن آب، فشار آب منفذی پیوسته زیاد می‌گردد در نتیجه، نیروهایی که اصولا به وسیله تماس ذرات در امتداد قائم تحمل می‌شدند به آب منفذی منتقل می‌گردد (شکل ۲-۱- ب). با تداوم ارتعاش، زمانی خواهد رسید که فشار کل، معادل فشار آب منفذی می‌شود و بر اساس رابطه‌ی زیر

$$\sigma' = \sigma - u \qquad (۱-۲)$$

تنش موثر به سمت صفر میل می‌کند. مقاومت برشی خاک‌های غیر چسبنده، τ، که به زاویه اصطکاک داخلی و تنش موثر وارد بر اسکلت خاک بستگی دارد به صورت زیر بیان می شود.

$$\tau = \sigma' \tan\varphi' + c' \qquad (۲-۲)$$

$$\tau = \sigma' \tan\varphi' \quad , \quad c' = 0 \qquad \leftarrow\leftarrow\leftarrow\leftarrow \qquad \text{خاک غیر چسبنده}$$

$$\tau = (\sigma - u)\tan\varphi' \qquad u = \sigma \qquad \rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow \qquad \tau = 0$$

که در معادلات فوق τ: مقاومت برشی خاک، σ': تنش موثر قائم، σ: تنش کل قائم، u: فشار آب حفره‌ای و φ': زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. در این لحظه مطابق معادله (۲-۲) ماسه به‌طور موقتی سختی و مقاومت برشی خود را از دست می‌دهد و خاک ماسه‌ای رفتاری شبیه رفتار یک مایع که وزن مخصوص آن برابر با خاک اشباع است از خود نشان می‌دهد. خاکی که قبل از زلزله به صورت یک ماده جامد بود، بعد از زلزله به صورت یک سیال رفتار می‌کند. این پدیده‌ی یکی از اصلی‌ترین دلایل خرابی شمع‌ها و سازه‌های متکی بر آن‌ها در زلزله‌های اخیر گزارش شده است، از جمله می‌توان به زلزله‌های ۱۹۶۴ نیگاتا ژاپن و آلاسکا، ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، ۱۹۹۹ کوکایلی[۱] ترکیه، ۲۰۰۱ بوجی هند[۲] اشاره نمود[۱۴].

۱ Kocaeil
۲ Bhuj

با شروع روانگرایی اولیه ماسه شل تغییرشکل نامحدودی را متحمل می‌شود و یا ممکن است بدون بسیج شدن مقاومت قابل‌توجه در برابر تغییرشکل، جریان یابد. در نتیجه منجر به نشست سازه‌ها، زمین لغزش‌ها، تسریع گسیختگی‌های مربوط به سدهای خاکی، جوشش ماسه، شناور شدن لوله‌های مدفون در خاک و مخازن یا بروز انواع دیگر خرابی‌ها می‌شود[۷ و ۱۰]. در ماسه نیمه‌متراکم و متراکم برای وقوع روانگرایی اولیه نیاز به تکرار بیشتر تنش‌های دوره‌ای (سیکلیک) یا تنش دوره‌ای با شدت بیشتر است. اعمال تنش دوره‌ای به‌دلیل تمایل ماسه نیمه‌متراکم به اتساع منجر به کاهش فشار آب حفره‌ای می‌شود. بنابراین در خاک مقاومت کافی برای جلوگیری از جریان یافتن به وجود می‌آید. حین کسب مقاومت، خاک باید چند درجه تغییرشکل را متحمل شود. همچنان که لرزش‌ها ادامه می‌یابد، مقدار تغییرشکل مورد نیاز برای ایجاد وضعیت پایدار خاک افزایش می‌یابد اما از یک حد مشخص بیشتر نمی‌شود. این پدیده روانگرایی اولیه با پتانسیل کرنش محدود[۱] یا تحرک دوره‌ای نامیده می‌شود[۲۱].

بعد از روانگرایی همزمان با خروج آب تماس بین ذرات خاک مجددا برقرار شده و حالتی مانند آنچه که در شکل (۲-۱۲- ج) نشان داده شده است به‌وجود می‌آید که همان گیرش مجدد توده خاک است، که موجب نشست خاک می‌شود. کاهش حجم در خاک نشست کرده، برابر حجم آبی است که از خاک خارج شده است.

۲-۲-۲- انواع گسیختگی زمین به علت روانگرایی

چهار نوع گسیختگی به علت روانگرایی در زمین بوجود می‌آید:

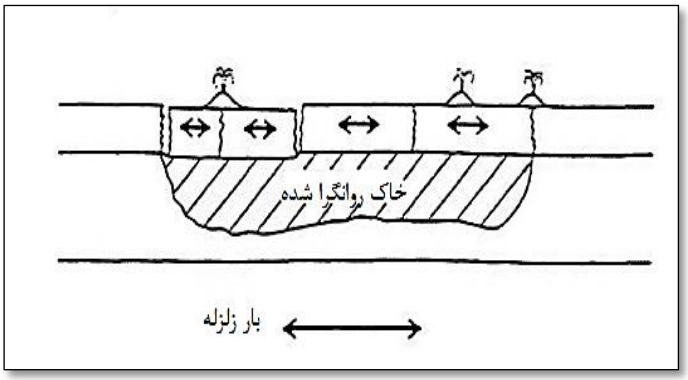
۱) گسیختگی جریانی[۲]: این نوع گسیختگی در زمین‌های شیب‌دار با شیب بیش از ۵٪ رخ می‌دهد. گسیختگی جریانی زمانی رخ می‌دهد که توده‌ای از خاک دانه‌ای شل اشباع مقاومت برشی خود را بعد از روانگرایی اولیه از دست بدهد و تنش برشی اعمالی (موجود) بیشتر از مقاومت برشی خاک بشود[۷].

۲) نوسان زمین[۱]: زمانی که زمین آنقدر مسطح است که اجازه جابه‌جایی جانبی را دهد، روانگرایی در اعماق پایین‌تر موجب شکستن و جدا شدن لایه‌های بالایی می‌شود این بلوک‌های شکسته شده بر روی لایه روانگرا شده به

---

۱ Limit strain potential
۲ Flow failures

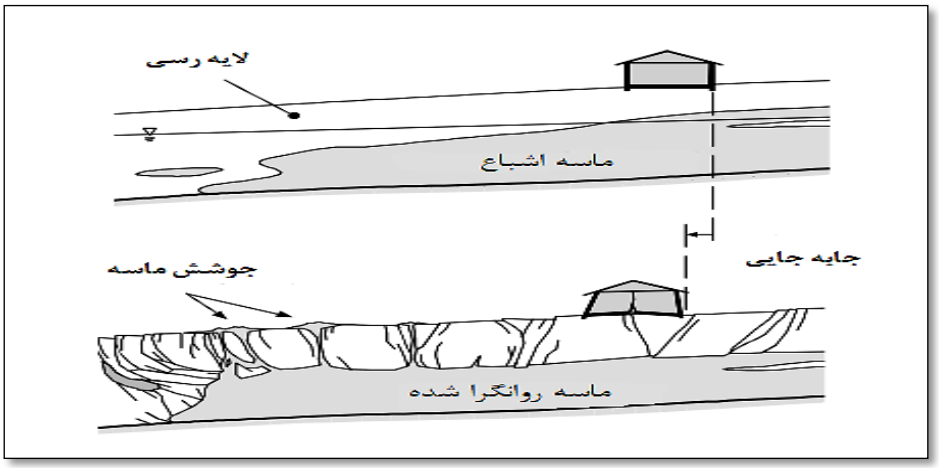
عقب و جلو حرکت می‌کنند و همدیگر را هل می‌دهند این پدیده باعث نوسان سطح زمین می‌شود. نوسان زمین در شکل (۲-۲) ملاحظه می‌شود[۷].



شکل (۲-۲): نوسان زمین[۷]

۳) کاهش ظرفیت باربری: همانطور که گفته شد به علت افزایش فشار آب منفذی، مقاومت و سختی خاک مطابق معادله (۲-۲) کاهش می‌یابد[۷].

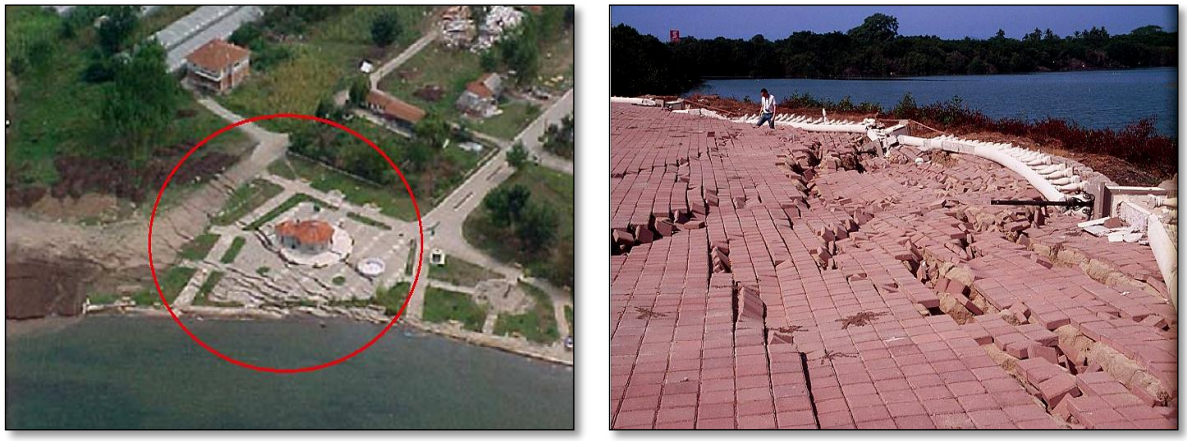
۴) گسترش جانبی[۲]: یکی از رایج‌ترین گسیختگی‌های زمین است که با وقوع روانگرایی در زمین‌ها با شیب ملایم و کمتر از ۵٪ رخ می‌دهد. این پدیده شامل جابه‌جایی جانبی بلوک عظیم خاک سطحی به علت روانگرا شدن لایه زیرین آن است. جابه‌جایی دایمی بلوک خاک در محدوده چند سانتی‌متر تا ۱۰ متر به علت این پدیده در آمریکا ژاپن و سایر کشورها مشاهده شده‌است[۷] .



شکل (۲-۳): گسترش جانبی زمین[۸]

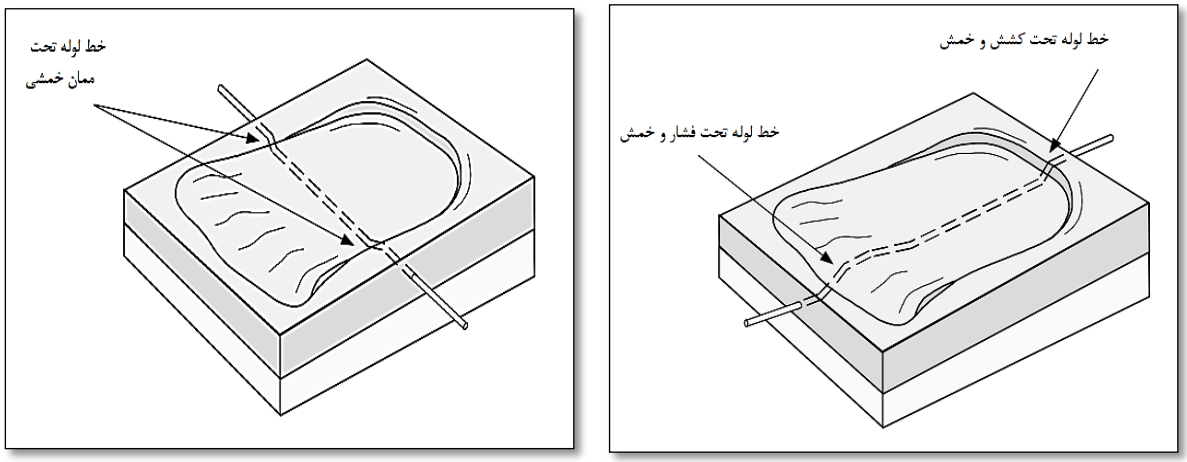
۱ ground Oscillation
۲ Lateral Spreading

در سال ۱۹۹۲ با مطالعه صدها مورد گسیختگی زمین بر اثر وقوع روانگرایی، بارلت و یود به این نتیجه رسیدند که احتمال وقوع جابه‌جایی جانبی قابل‌توجه در زلزله با بزرگای کمتر از ۶ درجه در مقیاس ریشتر بسیار کم است. برای خاک‌های ماسه‌ای متراکم این احتمال در زلزله با بزرگای کمتر از ۸ ریشتر بسیار کم است[۷].



شکل (۲-۴): گسترش جانبی زمین، زلزله کوکایلی ترکیه ۱۹۹۹[۱۰]

گسترش جانبی زمین می‌تواند بر تجهیزات طویل مدفون در خاک (خطوط حیاتی جریان) تاثیر فاجعه‌آمیزی داشته باشد. این اعتقاد وجود دارد که در طی زلزله بزرگ ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو هرگونه شکستی در شبکه آبرسانی به علت وقوع گسترش‌جانبی رخ داده است؛ در نتیجه تلاش برای خاموش کردن آتش‌سوزی نافرجام ماند و اکثر قسمت‌های سانفرانسیسکو نابود شدند[۱۲].



شکل (۲-۵): تاثیرگسترش جانبی زمین بر سازه‌های مدفون[۸]

۲-۳- مثال‌هایی از خرابی‌های ناشی از روانگرایی

اثرات روانگرایی روی فونداسیون‌های عمیق بسیار مخرب و پرهزینه است. تغییرشکل‌های دائمی و جانبی زمین (گسترش‌جانبی)، چه به‌صورت تنها و چه به صورت ترکیب با نیروهای اینرسی روسازه و گشتاورهای به وجود آمده در طول لرزش‌ها یک منبع مهم خطر و نگرانی محسوب می‌شود. بسیاری از خرابی شمع‌ها نیز در طول زمین لرزه‌های نیگاتا (۱۹۶۴) و هایوگوکن نامبو[۱] (۱۹۹۵) در زمین روانگرا دیده شد. در شکل (۲-۶) واژگونی مجتمع مسکونی به علت روانگرایی خاک زیر شالوده آن در زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا ژاپن دیده می‌شود و در شکل (۲-۷) خرابی جاده بر اثر روانگرایی لایه‌های زیرین آن را نشان داده شده است.

شکل (۲-۶): مجتمع مسکونی واژگون شده در زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا [۱۰]

شکل (۲-۷): خرابی جاده بر اثر روانگرایی لایه‌های زیرین [۱۰]

۱ Hyogoken-Nambu

خاک روان شده و فشار بیشتری به دیوارهای حایل وارد می‌کند که می‌تواند باعث لغزش و کج شدن آن‌ها شود.

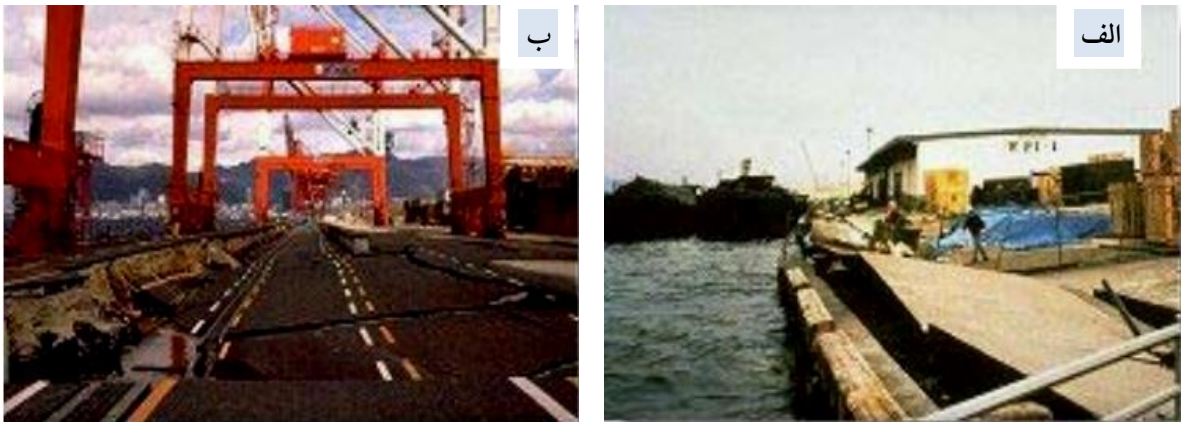
شکل (۲-۸): خرابی دیوار حایل بر اثر گسترش جانبی، کوبه ۱۹۹۵ [۱۰]

جوشش ماسه که حین وقوع زلزله در سطح زمین مشاهده می‌شود دلیل بر وقوع روانگرایی است. در شکل (۲-۹) جوشش ماسه در آستانه اشرفیه بر اثر روانگرایی خاک در زلزله منجیل نشان داده شده است. شکل (۲-۱۰) نمونه‌های دیگری از جوشش ماسه مشاهده شده بعد از زلزله را نشان می‌دهد.

شکل (۲-۹): جوشش ماسه در کف خانه در آستانه اشرفیه، زلزله منجیل ۱۹۹۰ [۱۰]

شکل (۲-۱۰): الف) جوشش ماسه ب) جوشش ماسه، المپیا، واشنگتن ۲۰۰۱ [۱۰]

روانگرایی فقط در خاک‌های اشباع رخ می‌دهد بنابراین نواحی پست نزدیک رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، خلیج‌ها و اقیانوس‌ها مستعد بروز این پدیده می‌باشند. روانگرایی ممکن است باعث رانش خاک به طرف آب و ایجاد نشست وسیعی در خاک شود. به عنوان مثال می‌توان لغزش رخ داده در دریاچه مرسد در سال ۱۹۵۷ را نام برد. از آنجا که بنادر و اسکله‌ها معمولا در نواحی مستعد روانگرایی قرار گرفته‌اند، لذا در طول زلزله‌های گذشته متحمل خرابی‌های زیادی شده‌اند. زمانی که خاک زیر چنین سازه‌هایی روانگرا می‌شود، فشار وارد به سازه بسیار افزایش می‌یابد بطوریکه باعث لغزش و کج شدن سازه به طرف آب می‌شود. در شکل (۲-۱۱- الف) خرابی یک دیوار حایل و حرکت جانبی آن و در شکل (۲-۱۱- ب) جابه‌جایی یک اسکله در جزیره پورت در اثر روانگرایی نشان داده شده‌است[۱۱و۱۲]. در شکل (۲-۱۲) مثال‌های دیگری از خرابی به علت وقوع روانگرایی مشاهده می‌شود.



شکل (۲-۱۱): الف) خرابی دیوار حایل و حرکت جانبی آن بر اثر روانگرایی ب) جابه‌جایی اسکله در جزیره پورت براثر روانگرایی خاک [۱۰]

شکل (۲-۱۲): الف) نشست آپارتمان و تکیه دادن به ساختمان مجاور به علت روانگرا شدن خاک زیر پی در زلزله ترکیه ب) نشست پیاده‌رو در زلزله نیشینومیا [۱۰]

۲-۴- مراحل مختلف بارگذاری و پاسخ شمع حین زلزله

حین زلزله، خاک روی بستر سنگی، با لرزشی متشکل از امواج مختلف مواجه می‌شود که عبارتند از[۱۳]:

امواج برشی (S)[۱] ، امواج فشاری (P) [۲] و امواج سطحی ریلی (رایله) و لاو[۳]

حرکت زمین به مشخصات سختی لایه‌های خاک روی بستر سنگی بستگی دارد. وقتی امواج لرزشی به خاک اطراف شمع می‌رسد، خاک تمایل به تغییرشکل دارد و این خاک تغییرشکل یافته تمایل دارد شمع را متعاقب خودش حرکت دهد. حین زلزله شمع مدفون در خاک دو فاز را متحمل می‌شود:

۱) قبل از اینکه روسازه شروع به نوسان کند و نیروی اینرسی اعمال کند، شمع مجبور به پیروی از حرکت خاک اطراف خود می‌شود. خاک تغییرشکل یافته، شمع را نیز حرکت می‌دهد و بسته به صلبیت خمشی[۴] (EI) شمع، شمع هم تغییرشکل می‌دهد. طبیعتا هرچه صلبیت خمشی شمع بیشتر باشد، تغییرشکل جانبی آن نیز کمتر است. این اندرکنش بین خاک تغییرشکل یافته و شمع، اندرکنش سینماتیکی[۵] نامیده می‌شود وخاک تغییرشکل یافته به شمع ممان خمشی اعمال می‌کند و شمع تحت خمش قرار می‌گیرد.

۲) زلزله از طریق شمع و سر شمع[۶] به روسازه می‌رسد و باعث نوسان روسازه می‌شود. نوسان روسازه باعث بوجود آمدن نیروی اینرسی جانبی، نیروی محوری متغییر و ممان خمشی در سر شمع می‌شود. در این مرحله شمع نیروی محوری اضافی، نیروی جانبی و ممان خمشی اضافی متحمل می‌شود (ناشی از روسازه) این پروسه اغلب با نام اندرکنش اینرسی[۷] شناخته می‌شود[۱۶].

این دو فاز در مدت زمان بسیار کوتاه رخ می‌دهد. در این مرحله فشار همه جانبه‌ای که خاک اطراف به شمع وارد می‌کند به طور محسوس کاهش نیافته است و رفتار شمع را می‌توان به صورت تیر بر روی بستر الاستیک در نظر

---

۱ Shear wave
۲ Primary wave
۳ Rayleigh and Love
۴ Flexural Rigidity
۵ Kinematic interplay
۶ Pile-cap
۷ Inertia interplay

گرفت. در واقع این بستر الاستیک همان خاک اطراف شمع است که مقاومت جانبی لازم را برای شمع فراهم می‌کند. وقتی مقاومت جانبی اعمالی از طرف خاک بر شمع برقرار است، تغییرات در نیروی محوری، اثر چندانی روی شمع ندارد، چون شمع‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تغییرات معمول در نیروی محوری اعمالی بر آن‌ها باعث خردشدگی مصالح نمی‌شود. در واقع ضریب اطمینان بالایی در برابر این نوع خرابی دارند[۱۳].

۲-۵- رفتار شمع در خاک مستعد روانگرایی

حین زلزله، شمعی که از لایه‌های ماسه‌ای شل و نیمه‌شل اشباع عبور می‌کند و روی خاک متراکم یا بستر سنگی تکیه می‌زند، دو وضعیت تغییر تنش را متحمل می‌شود[۱۳]:

۱) شمع‌ها ، نیروی محوری را به دو طریق منتقل می‌کنند (شکل ۲-۱۳- الف):

الف) نیروی اصطکاک بین جداره شمع و خاک (Q_S)

$$Q_S = \sum P \,.\, \Delta L \,.\, f \qquad (۳-۲)$$

$$f = K \,.\, \acute{\sigma_v} \,.\, tan\delta \qquad (۴-۲)$$

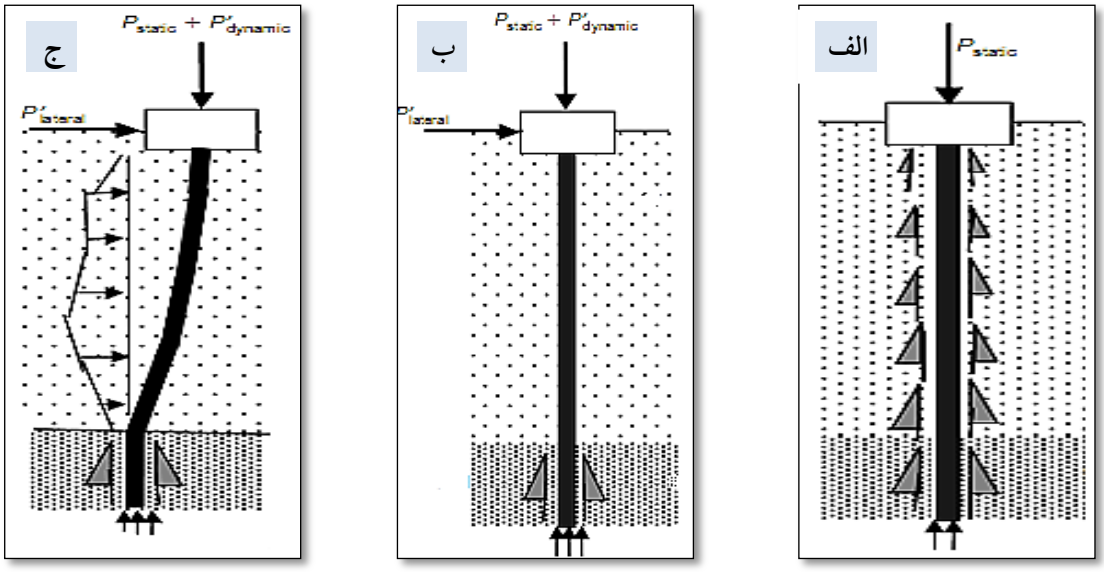
که در این معادلات، P : محیط مقطع شمع، f : مقاومت اصطکاکی واحد سطح، ΔL : طول مورد نظر شمع K: ضریب فشار جانبی خاک، $\acute{\sigma_v}$: تنش موثر در عمق مورد نظر و δ : زاویه اصطکاک بین شمع و خاک است.

ب) مقاومت نوک شمع(Q_P)

وقتی لرزش‌ها ادامه می‌یابد خاک شل و نیمه‌شل تمایل به کاهش حجم دارد. با افزایش سیکل‌های کرنش برشی، اضافه فشار آب حفره‌ای به حدی می‌رسد که با تنش موثر برابر می‌شود، در نتیجه مقاومت اصطکاکی سطح طبق رابطه (۲-۴) به صفر میل می‌کند، در نتیجه از دو روش انتقال بار محوری عملا Q_S بسیار ناچیز می‌شود و تمام نیروی محوری شمع برای بسیج کردن مقاومت نوک شمع به سمت انتهای شمع رهسپار می‌شود و تنها مقاومت نوک شمع در انتقال بار نقش ایفا می‌کند که اگر از نیروی محوری اعمالی کمتر باشد نشست رخ می‌دهد.

۲) با افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش موثر، سختی خاک اطراف شمع نیز کاهش می‌یابد. چون با افزایش عمق، تنش موثر نیز افزایش می‌یابد، با گذشت زمان و افزایش فشار آب حفره‌ای، جبهه تنش موثر صفر از سطح شروع و در عمق پیش می‌رود تا در نهایت کل لایه مستعد روانگرایی، روانگرا می‌شود. در این حالت خاک هیچگونه تکیه‌گاهی برای شمع بوجود نمی‌آورد و شمع مانند یک ستون لاغر با بار محوری عمل می‌کند و یک مزاحمت کوچک توسط نیروهای سینماتیکی خاک یا اینرسی روسازه می‌تواند باعث ناپایداری کمانشی شمع بشود (شکل ۲-۱۳- ب).

در زمین‌های شیب‌دار، به علت حرکت جانبی زمین، نیروی جانبی اضافی دیگری به شمع وارد می‌شود که می‌تواند ممان خمشی قابل توجه‌ای در شمع بوجود آورد. (شکل ۲-۱۳- ج)



شکل (۲-۱۳): شمع تحت بار محوری الف) قبل از زلزله ب) بعداز وقوع روانگرایی ج) زمین شیب‌دار و اثر گسترش جانبی زمین[۱۳]

۲-۶- نیروهای عمده اعمالی بر شمع حین زلزله

۱) نیروی محوری: این نیرو به صورت فشاری است و می‌توان آن را از تعادل استاتیکی بدست آورد. این نیروی فشاری، حین زلزله به علت اثر نیروی دینامیکی ناشی از وزن روسازه، کم و زیاد می‌شود. البته باید اثر نیروی سینماتیکی جریان خاک زیرشالوده را نیز در نظر گرفت.

$$\text{نیروی محوری شمع} = \text{نیروی محوری}_{\text{استاتیک}} \pm \text{نیروی محوری}_{\text{دینامیک}}$$

۲) نیروی جانبی: این نیرو ناشی از اینرسی روسازه بر اثر نوسان است (اندرکنش اینرسی). این نیرو به صورت مستقیم به جرم روسازه بستگی دارد.

۳) نیروی سینماتیکی ناشی از حرکت زمین که آن را اندرکنش سینماتیکی می‌نامند و به صورت نیروی جانبی اثر می‌کند. این نیرو خود به دو گروه تقسیم می‌شود. دسته اول نیروی گذرایی است که حین زلزله و با توجه به حرکت جرم خاک اطراف شمع، به شمع وارد می‌شود و بعد از اتمام لرزش‌ها و توقف حرکت خاک پایان می‌یابد. دسته دوم نیروی باقی مانده ناشی از جریان یافتن خاک یا گسترش‌جانبی است که حتی پس از اتمام زلزله و لرزش‌ها هم پابرجاست[۱۴].

۲-۷- اثر ترکیبی نیروی اینرسی روسازه و نیروی سینماتیکی خاک

۱- طبق پیشنهاد ایشی‌هارا[۱] (۱۹۹۷) اثر نیروی اینرسی روسازه و نیروی جانبی خاک (ناشی از گسترش‌جانبی زمین) را همزمان با هم در نظر نمی‌گیرند. او دلیل این پیشنهاد را اینگونه بیان کرد[۲۰]:

از آن‌جا که حین زلزله، روانگرایی تقریبا در زمان شتاب ماکزیمم شروع می‌شود، لرزش‌ها وتکان‌های بعد از این زمان از شدت کمتری برخوردار است، در نتیجه نیروی اینرسی ناشی از روسازه بعد از وقوع شتاب ماکزیمم از شدت کمتری برخوردار است و با گذشت زمان و کاهش شتاب زلزله، این نیرو همچنان کمتر می‌شود. این در حالی است که با ادامه پروسه روانگرایی (بعد از شتاب ماکزیمم) گسترش‌جانبی زمین شروع می‌شود. پس نیروی حداکثر اینرسی و نیروی ناشی از گسترش‌جانبی زمین همزمان و به صورت ترکیبی، به شمع وارد نمی‌شوند و اثر هر کدام از نیروهای جانبی را باید به صورت جداگانه درنظر گرفت.

۲- توکیماتسو[۲] و همکاران (۲۰۰۵) با انجام آزمایش میزلرزان بر روی گروه شمع در ماسه خشک و اشباع مشاهده نمودند اثر نیروی اینرسی روسازه و نیروی سینماتیکی خاک بر روی شمع به پریود طبیعی زمین و روسازه بستگی دارد. طبق نتایج به دست آمده[۱۷]:

---

۱ Ishihara
۲ Tokimatsu

الف) اگر $T_s > T_g$، یعنی پریود طبیعی روسازه بیشتر از پریود طبیعی زمین باشد نیروی سینماتیک خاک و نیروی اینرسی هم فاز نیستند و حداکثر تنش در شمع در نقطه‌ای ما بین اثر این دو رخ می‌دهد. ممان خمشی حداکثر در شمع طبق پیشنهاد توکیماتسو و سوزوکی (۲۰۰۵) به صورت زیر تخمین زده می‌شود.

$$\mathrm{M}_{max\,(\text{شمع})} = \sqrt{\mathrm{M}^2{}_{\text{اینرسی}} + \mathrm{M}^2{}_{\text{سینماتیک}}} \qquad (۵-۲)$$

ب) اگر $T_s < T_g$، یعنی پریود طبیعی روسازه کمتر از پریود طبیعی زمین باشد نیروی سینماتیک و نیروی اینرسی هم فاز هستند و حداکثر تنش در شمع در زمانی که اثر این دو حداکثر است رخ می‌دهد. طبق پیشنهاد توکیماتسو و سوزوکی (۲۰۰۵):

$$\mathrm{M}_{max\,(\text{شمع})} = M_{\text{اینرسی}} + \mathrm{M}_{\text{سینماتیک}} \qquad (۶-۲)$$

۲-۸- مفهوم اثر بالا- پایین و پایین- بالا ایشیهارا

ایشی‌هارا در چهاردهمین کنفرانس بین المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک در هامبورگ (۱۹۹۷) نیروی لرزه‌ای اعمالی بر شمع حین زلزله را تحت دو عنوان معرفی کرد[۲۰].

۲-۸-۱- اثر بالا- پایین

در شروع تکان‌ها نیروی اینرسی رو سازه ابتدا به سر شمع و نهایتا به خاک منتقل می‌شود. فرض می‌شود در طول تکان‌های اصلی خاک ماسه‌ای موجود در پروفیل خاک به علت روانگرایی هنوز خیلی نرم نشده است و حرکت نسبی بین خاک و شمع خیلی کوچک است. از آنجا که بارهای افقی، ناشی از نیروی اینرسی روسازه است آن را اثر بالا- پایین نامید. ایشان نتیجه‌گیری کرد که خرابی‌های مشاهده شده در قسمت بالایی شمع بعد از زلزله مربوط به این اثر است.