



ALIREZA ELMAKCHI
civil engineering group

نحوه اجرای کوله های پل و نحوه اجرای آن – مهندس علیرضا المکچی



ALIREZA ELMAKCHI
civil engineering group

نحوه اجرای کوله های پل و نحوه اجرای آن

تهیه کننده: مهندس علیرضا المکچی

کانال آموزش های مهندسی عمران

[@civil_engineering_learnings_AE](https://www.instagram.com/civil_engineering_learnings_AE)





فهرست مطالب

۱-۱- مقدمه	۱۰
۲-۱- بیان مسئله	۱۰
۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق	۱۲
۴-۱- جنبه جدید و نوآوری تحقیق	۱۲
۱-۲- مقدمه	۱۵
۲-۲- طبقه بندی پل ها	۱۶
۱-۲-۲- پل های چوبی	۱۶
۲-۲-۲- پل های سنگی	۱۷
۳-۲-۲- پل های بتنی	۱۷
۱-۳-۲-۲- پل بتن مسلح	۱۷
۲-۳-۲-۲- پل بتن پیش تنیده	۱۸
۴-۲-۲- پل فلزی	۱۸
۱-۴-۲-۲- پوشش پل های فلزی	۱۸
۲-۴-۲-۲- طبقه بندی پل های فلزی	۱۹
۱-۲-۴-۲-۲- پل تیرهای حمال	۲۰
۲-۲-۴-۲-۲- پل قوسی	۲۰
۳-۲-۴-۲-۲- پل ترکیبی	۲۱
۳-۲- انواع پل های بدون درز	۲۱
۱-۳-۲- اثر حرارت در سازه پل ها	۲۱
۲-۳-۲- سیستم های دارای درز انبساط	۲۲



- ۳-۳-۲- سیستم های بدون درز ۲۵
- ۴-۲- سیستم یکپارچه کوله و عرشه ۲۶
- ۴-۲-۱- کوله نیمه یکپارچه ۲۶
- ۴-۲-۲- انواع مختلف کوله های پل یکپارچه ۲۸
- ۴-۲-۱-۲- مزایای پل های با کوله یکپارچه ۲۸
- ۴-۲-۳- مشکلات پل های با کوله یکپارچه ۳۰
- ۵-۲- نمونه هایی از پل هایی یکپارچه ۳۲
- ۶-۲- عملکرد شمع های فولادی H شکل در پل های یکپارچه با کوله کوتاه تحت اثر تغییرات حرارتی ۳۳
- ۶-۲-۱- جابجایی چرخه ای شمع های فولادی تحت اثر تغییرات حرارتی ۳۵
- ۶-۲-۲- اندرکنش خاک - شمع H شکل ۳۶
- ۶-۲-۳- نتایج تحلیل ۳۷
- ۶-۲-۱-۳- سختی خاک احاطه کننده شمع ها ۳۷
- ۶-۲-۲-۳- اندازه و جهت قرارگیری شمع ها ۳۷
- ۷-۲- فشار وارد بر کوله تحت اثر تغییر طول حرارتی عرشه ۳۷
- ۸-۲- ارزیابی اثرات وابسته به زمان در پل های یکپارچه ۴۲
- ۹-۲- نکات مهم در طراحی پل های یکپارچه با عرشه مرکب ۴۳
- ۱۰-۲- مدل سازه ای بکار رفته برای در نظر گرفتن رفتار وابسته به زمان عرشه ۴۴
- ۱۰-۲-۱- نتیجه گیری از تحلیل اثرات وابسته به زمان در پل های یکپارچه با عرشه مرکب بتن فولادی ۴۶
- ۱۱-۲- رفتار و مشخصات لرزه ای کوله های یکپارچه ۴۶
- ۱۲-۲- روش های مختلف مدلسازی شمع ها ۴۸
- ۱۲-۲-۱- مدلسازی ارتجاعی شمع و خاک ۴۸
- ۱۲-۲-۲- روش طول موثر گیرداری ۵۰



- ۵۰..... ۳-۱۲-۲- شمع الاستیک و مدل اجزای محدود
- ۵۱..... ۴-۱۲-۲- شمع صلب و خاک لاستیک
- ۵۲..... ۱۳-۲- مدلسازی خاک پشت کوله
- ۵۲..... ۱۴-۲- پیشینه تحقیق
- ۶۱..... ۲-۳- تعریف کوله پل
- ۶۱..... ۳-۳- انواع کوله ها
- ۶۱..... ۱-۳-۳- معرفی کوله بسته
- ۶۴..... ۲-۳-۳- معرفی کوله باز
- ۶۷..... ۳-۳-۳- معرفی کوله های خاک مسلح



فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): پل کینتای واقع در ژاپن به شکل قوسی ۱۶
- شکل (۲-۲): پل سنگی دماوند ۱۷
- شکل (۳-۲): مدل شماتیک پل یکپارچه ۲۲
- شکل (۴-۲): هندسه ساده شده پل های یکپارچه ۲۴
- شکل (۵-۲): اجزا و قسمت های تشکیل دهنده پل های یکپارچه ۲۴
- شکل (۶-۲): مدل شماتیک پل باربر جاده ای بدون درز انبساط با تکیه گاه یکپارچه ۲۷
- شکل (۷-۲): نمونه اجراء شده پل نیمه یکپارچه ۲۸
- شکل (۸-۲): پل تک دهانه متعارف با درز انبساط ۳۴
- شکل (۹-۲): پل تک دهانه یکپارچه بدون درز انبساط ۳۵
- شکل (۱۰-۲): نمودار منحنی P-Y ۳۶
- شکل (۱۱-۲): نحوه انتقال تغییر طول عرشه به دیواره انتهایی پل ۳۸
- شکل (۱۲-۲): نمونه اجراء شده پل یکپارچه ۳۹
- شکل (۱۳-۲): عکس العمل کوله و شمع پل یکپارچه تحت اثر نیروی وارد بر عرشه ۴۰
- شکل (۱۴-۲): شمع پل یکپارچه و انحراف منحنی شمع، تحت اثر بارهای حرارتی و اثرات پی دلتا و بار محوری P و مشخص شدن حداکثر لنگر و چرخش سر شمع در کوله ۴۱
- شکل (۱۵-۲): نمونه مدلسازی شده پل یکپارچه با فنر ۴۳
- شکل (۱۶-۲): مدل سازی روسازه ۴۵
- شکل (۱۷-۲): نمای جانبی از تکیه گاه نیمه یکپارچه قبل از اصلاح توسط اداره حمل و نقل ویرجینیا ۴۷
- شکل (۱۸-۲): مدل شمع و خاک الاستیک ۴۹
- شکل (۱۹-۲): نمودار نیرو-جابجایی خاک ۴۹



- شکل (۲-۲۰): روش طول موثر گیرداری..... ۵۰
- شکل (۲-۲۱): شمع الاستیک و مدل اجزای محدود دوبعدی و سه بعدی خاک..... ۵۱
- شکل (۲-۲۲): مدل شمع صلب و خاک پلاستیک..... ۵۱
- شکل (۳-۱)، کوله پل..... ۶۱
- شکل (۳-۲)، کوله بسته بتن مسلح..... ۶۲
- شکل (۳-۳)، کوله مصالح بنایی محور شمشک دیزین..... ۶۲
- شکل (۳-۴)، کوله بسته با پشتبند..... ۶۳
- شکل (۳-۵)، شماتیک کوله های باز..... ۶۴
- شکل (۳-۶)، چند نمونه از کوله های باز..... ۶۴
- شکل (۳-۷)، شیب پایداری یا Angle of Repose..... ۶۵
- شکل (۳-۸)، شیب پایداری براساس زوایای اصطکاک خاک های مختلف..... ۶۵
- شکل (۳-۹)، نمونه هایی از تقاطع غیر همسطح..... ۶۶
- شکل (۳-۱۰)، مکانیسم عملکرد سیستم خاک مسلح..... ۶۷
- شکل (۳-۱۱)، کوله خاک مسلح در پل سگمنتی به روش طره متعادل..... ۶۸
- شکل (۳-۱۲)، دیوار خاک مسلح فرودگاه SeaTac در ایالت واشینگتن به ارتفاع حدود ۴۲ متر..... ۶۸
- شکل (۳-۱۳): مشخصات مصالح خاگریز براساس ضوابط آیین نامه ای..... ۶۹
- شکل (۳-۱۴)، انواع المان های مسلح کننده در سیستم خاک مسلح..... ۷۰
- شکل (۳-۱۵)، انواع پانل های پیش ساخته بتنی..... ۷۱
- شکل (۳-۱۶)، نحوه اتصال مسلح کننده های پلیمری و تسمه فلزی به پانل های بتنی پیش ساخته..... ۷۱
- شکل (۳-۱۷)، احداث نشیمن عرشه بر روی خاک مسلح..... ۷۲
- شکل (۳-۱۸)، احداث کوله های خاک مسلح براساس حالت دوم..... ۷۳



فهرست جداول

جدول (۱-۲): پل های یکپارچه با کوله های کوتاه در ایالت های مختلف متحده آمریکا ۳۲



فصل اول

مقدمه و کلیات



۱-۱- مقدمه

پل ها یکی از مهمترین انواع شریان های حیاتی و ارتباطی کانون های جمعیت می باشند که تا سال های اخیر بعلت عدم وجود آیین نامه های لرزه ای، طراحی لرزه ای آنها یا مورد توجه قرار نمی گرفت و یا بصورت سلیقه ای عمل می شد. به همین علت در هنگام وقوع زلزله آسیب های فراوانی در آنها بوجود می آمد. پل های یکپارچه بعنوان سازه هایی خاص، همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است. پل های یکپارچه (پل های بدون درز)، نوعی از پل هستند، که در آن کوله و عرشه پل در جهت طولی به شکل یکپارچه بوده و با توجه به نبود درزهای انبساطی معمول که در پل ها به جهت تطابق انبساط و انقباض در عرشه پل ایجاد می شوند، این پل ها همانند یک قاب صلب عمل می نمایند.

زلزله و تغییرات حرارتی از جمله مهمترین عواملی هستند که میتوانند موجب تخریب پل ها گردند. کوله ها در ساختار پل بعنوان یک عضو مهم همانند فیوز عمل می کنند و برای جذب کردن انرژی تخریبی ستون ها و شالوده ها بکار می روند. بسیاری از پارامترهای موثر بر عملکرد کوله ها بدلیل محدودیت های موجود در آزمایشگاه برای مدلسازی فیزیکی آنها، مورد بررسی قرار نگرفته اند. در این تحقیق به بررسی تأثیر نوع اتصال شمع فلزی به کوله بت نآرمه پل های یکپارچه در افزایش ظرفیت حرکت طولی پل های یکپارچه پرداختیم.

۱-۲- بیان مسئله

اکثر پل های معمولی دارای درزهای انبساط هستند که از نظر مواد و هزینه نصب گران هستند. سال هاست که درزهای انبساط مشکلات تعمیر و نگهداری قابل توجهی را برای آژانس های حمل و نقل ایجاد کرده اند، زیرا آب، نمک و مواد شیمیایی از طریق آنها نفوذ می کنند و باعث تخریب گسترده اجزای پل می شوند [۱-۵]. حذف درزهای انبساط در پل ها ممکن است هزینه ساخت و ساز را کاهش دهد، بر بسیاری از مشکلات نگهداری غلبه کند و پایداری و دوام پل ها را افزایش دهد؛ بنابراین، اخیراً در بسیاری از مناطق آمریکای شمالی،



پل های بدون اتصال یا یکپارچه بسیار محبوب شده اند و به عنوان جایگزینی برای پل های معمولی در نظر گرفته می شوند.

پل های یکپارچه (پل های بدون درز)، نوعی از پل هستند که در آن کوله و عرشه پل در جهت طولی به شکل یکپارچه بوده و با توجه به نبود درزهای انبساطی معمول که در پل ها به جهت تطابق انبساط و انقباض در عرشه پل ایجاد می شوند، این پل ها همانند یک قاب صلب عمل می نمایند. بررسی های صورت گرفته نشان داده اند که درزهای انبساطی و تکیه گاه های لغزشی که به جهت تطابق انقباض و انبساط دمایی در عبور گاه پل ها ایجاد می شوند، منشأ اصلی هزینه بالای نگهداری و تعمیر پل ها محسوب می شوند. برای رفع این مشکلات یک تکیه گاه منعطف با یک ردیف شمع برای امکان حرکت طولی پل به دلیل اثرات حرارتی، انقباض و خزش ضروری است. رایج ترین نوع شمع های مورد استفاده در تکیه گاه پل های یکپارچه، شمع های H شکل فولادی هستند.

تغییرات دمایی روزانه و فصلی منجر به تحمیل جابه جایی های افقی چرخه ای بر روی عرشه پل های یکپارچه و در نتیجه روی تکیه گاه ها، پرکننده ها، شمع های H شکل فولادی در انتهای دال های می شود. بزرگی این جابه جایی های چرخه ای تابعی از اختلاف دما و طول سازه است. با افزایش طول پل های یکپارچه، جابه جایی های چرخه ای ناشی از دما در اجزای پل و خاک اطراف نیز ممکن است بزرگ تر شوند. در نتیجه، گره کنترل جابه جایی چرخه ای در انتهای دال های ممکن است نتوانند چنین جابه جایی های بزرگی را تحمل کند، خاک های پشت کوله ممکن است برآمده شده و دال را به سمت بالا فشار دهد یا نیروهای محوری زیادی در عرشه پل ایجاد شود. مهم تر از آن، شمع های H شکل فولادی است که تغییر شکل های چرخه ای فراتر از ظرفیت الاستیک خود تجربه می کنند. این ممکن است منجر به شکست نهایی شمع ها یا کاهش عمر مفید آنها شود. بعلاوه، تکیه گاه ها ممکن است تحت نیروهای برشی زیاد و لنگرهای خمشی بیش از ظرفیت برشی یا خمشی نهایی خود قرار گیرند.



۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

در پل های یکپارچه به علت نبود درز انبساط بین عرشه و دیوار کوله، آزادی انبساط و انقباض حرارتی ندارد و باید کلیه تنش های حرارتی توسط سازه و خاک تحمل شود. پل ها با کوله یکپارچه علاوه بر تحمل بارهای مرده و زنده منتقل شده از عرشه باید برای نیروهای خزش و انقباض عرشه، تغییرات دما، نشست جزئی تکیه گاه ها نسبت به هم و اندرکنش خاک و شمع ها و کوله طراحی شود. این کوله ها دارای اتصال کامل بتن فولادی در قسمت دال عرشه به کوله است. در حال حاضر دستورالعملی برای تعیین حداکثر طول پل های یکپارچه وجود ندارد. طراحی چنین پل هایی توسط AASHTO موردتوجه قرار نگرفته است. فقط تعداد محدودی از ادارات حمل و نقل ایالتی مشخصات جامع خود را برای طراحی پل های یکپارچه دارند. در واقع، مهندسان طراحی پل به طور کلی به عملکرد پل های یکپارچه ساخته شده قبلی برای تعیین حداکثر طول برای طرح های جدید خود استفاده می کنند.

۴-۱- جنبه جدید و نوآوری تحقیق

پل ها یکی از مهم ترین انواع سازه ها هستند که تا سال های اخیر به علت عدم وجود آیین نامه های لرزه ای، طراحی لرزه ای آنها یا موردتوجه قرار نمی گرفت و یا به صورت سلیقه ای عمل می شد.

به همین علت در هنگام وقوع زلزله ها آسیب های فراوانی در آنها به وجود می آمد. پل های یکپارچه به عنوان سازه هایی خاص همواره موردتوجه محققان قرار گرفته است. پل های یکپارچه (پل های بدون درز)، نوعی از پل هستند که در آن کوله و عرشه پل در جهت طولی به صورت یکپارچه بوده و باتوجه به نبود درزهای انبساطی معمول که در پل ها به جهت تطابق انبساط و انقباض در عرشه پل ایجاد می شوند. به دلیل مزیت این گونه پل ها به بررسی تأثیر نوع اتصال شمع فلزی به کوله بتن آرمه پل های یکپارچه که باعث افزایش ظرفیت حرکت طولی پل های یکپارچه خواهد شد که در این تحقیق به این مورد خواهیم پرداخت و راهکارها و مزیت و معایب این موارد را بررسی خواهیم کرد. باتوجه به اینکه شمع به عنوان نگهدارنده کوله در پل های یکپارچه است



و نوع رفتار این شمع‌ها بر ظرفیت حرکت طولی پل، طول پل و ظرفیت خمشی تأثیر می‌گذارد، به همین دلیل نوع اتصال این شمع‌ها در رفتار کلی پل تأثیرگذار است و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که نوع این اتصالات بررسی می‌شود و بهینه‌ترین حالت معرفی می‌شود.



فصل ۲

مبانی نظری، پیشینه تحقیق



۲-۱- مقدمه

پل با سیستم‌های یکپارچه نوعی از پل است که در آن کوله‌های انتهایی پل به عرشه توسط بتن متصل می‌شود. بنابراین کوله و عرشه در این سیستم در جهت طولی مانند یک قاب صلب عمل می‌کنند. در پل‌های با کوله یکپارچه بطور معمول درز انبساط وجود ندارد و نیازی به دستگاه تکیه‌گاهی درزی و تیرهای عرشه نیست. این سیستم از اوایل دهه ۱۹۳۰ رایج شد تا سال ۱۹۹۸ نزدیک به ۱۰۰۰۰ پل با کوله پیوسته در ایالات متحده آمریکا ساخته شده است. این تعداد زیاد نشان دهنده مزایای این پل‌ها بر پل‌های معمولی و رواج ساخت این پل‌ها در سطح جهان به خصوص ایالات متحده آمریکا است.

در انگلستان در دهه اخیر تمامی پل‌های با دهانه زیر ۶۰ متر اجباراً باید با این سیستم طراحی و ساخته شوند. این سیستم در کشورهای مختلف به نام‌های پل یکپارچه، کوله‌های یکپارچه، پل‌های با سیستم قاب صلب خوانده می‌شود. کوله‌های یکپارچه درز انبساط مابین عرشه و دیوار پیشانی کوله را با یک بتن‌ریزی یکپارچه حذف می‌کنند و باعث تردد بدون صدا و بدون ضربه خودروها از روی پل میشوند. نبود این درز مشکلات عدیده مرتبط با آن را از بین می‌برد که از جمله ریزش آب به قسمتهای زیر پل و هزینه تعمیر و تعویض لاستیکهای درزگیر و دیگر عناصر را شامل می‌شود. لیکن در این پل‌ها عرشه دیگر آزادی انبساط و انقباض حرارتی را ندارد و کلیه تنش‌های حرارتی توسط سازه و خاک باید تحمل شوند. مهندسان با تجربه در این بحث موافقت می‌کنند که پل‌های یکپارچه بطور معمول در درز معمولی‌اند، زیرا با حذف درز انبساط و همچنین حذف نئوپرن و یا دستگاه‌های تکیه‌گاهی دیگر مقدار بسیار زیادی در مخارج اولیه و نگهداری پل صرفه‌جویی می‌شود.

با توجه به عدم وجود درز انبساط مشکلات ناشی از درزها مرتفع می‌شود. علاوه بر این هزینه نگهداری از دستگاه‌های تکیه‌گاهی نیز کاهش می‌یابد. بعلاوه مزایای فوق‌العاده این سیستم بر پل‌های معمولی، در سال‌های اخیر استفاده از این سیستم رواج بسیاری یافته است. این نوع سازه‌ها از اعضای سازه‌ای و ژئوتکنیکی متفاوتی تشکیل شده است. رفتار اعضا و اندرکنش بین آنها تحت اثر بارهای اعمال شده پیچیده است. شناسایی این رفتار با در برداشتن کلیه متغیرهای دخیل در آن از اهمیت زیادی برخوردار است. از بین بارهای وارد شده



بار حرارت و زلزله نقش تعیین کننده ای در عملکرد پل یکپارچه دارد. تاکنون بررسی های در خصوص شناسائی رفتار اعضا این نوع سازه انجام گرفته است. در این تحقیق به شناسائی رفتار کوله یکپارچه بتن مسلح تحت اثر بار زلزله پرداخته می شود.

۲-۲- طبقه بندی پل ها

پل ها را از نقطه نظر مصالح تشکیل دهنده به شکل زیر طبقه بندی می کنند.

۲-۲-۱- پل های چوبی

این پل ها معمولاً به شکل قوسی (شکل ۱-۲)، با تیرهای مشبک و یا تیرهای حمال ساخته شده و در حال حاضر استفاده از آنها بصورت موقتی می باشد. نمونه ای از پل چوبی، روی رودخانه ی نیشیکی قرار دارد که از ۵ سازه قوسی تشکیل شده و در سال ۱۶۷۳ بنا گردیده است.



شکل (۱-۲): پل کینتای واقع در ژاپن به شکل قوسی



۲-۲-۲- پل های سنگی

با توجه به مقاومت مناسب فشاری مصالح سنگی، بسیاری از پل های طاقی از این مصالح ساخته شده اند (شکل ۲-۲). نظر به کمبود افراد سنگ کار و زمان نسبتاً طولانی لازم برای تهیه مصالح و اجرای سازه، امروزه استفاده از این پل ها محدود می باشد.



شکل (۲-۲): پل سنگی دماوند

۲-۲-۳- پل های بتنی

در بسیاری از پل های طاقی شکل، در حال حاضر از بتن، با توجه به مقاومت فشاری مطلوب آن به جای سنگ استفاده می شود.

۲-۲-۳-۱- پل بتن مسلح

با توجه به روش اجرا و نحوه بتن ریزی، پل های بتن مسلح را می توان از مقاطع مختلف و با اشکال دلخواه ساخت. با وجود این استفاده از مقاطع ساده در جهت کاهش هزینه قالب بندی همواره مورد نظر بوده است. در



بعضی از حالات استفاده از سیستم پیش ساختگی باعث حذف اجزاء نگهدارنده قالب ها و در نتیجه صرفه جوئی قابل ملاحظه می شود.

۲-۲-۳-۲- پل بتن پیش تنیده

با پیشرفت این تکنیک، به تدریج در دامنه وسیعی از ابنیه فنی، پل های بتن پیش تنیده جایگزین پل های فلزی و پل های بتن مسلح شده اند. بدین ترتیب با صرف هزینه کمتر، پل های با دهانه بزرگ ساخته می شوند. از طرف دیگر امکان بکارگیری تکنیک های جدید پل سازی با استفاده از این مصالح وجود دارد.

۲-۲-۴- پل فلزی

این پل ها به اشکال مختلف، با تیرهای حمال معمولی یا تیرهای مشبک فولادی، با قوس یا قالب های فلزی، نورد شده از ورق و المان های اتصالی ساخته شده اند. در ساخت این پل ها گاهی نیز از آلیاژهای سبک یا مقطع مرکب استفاده می گردد. استفاده از فولاد در ساخت پل های فلزی از قرن گذشته شروع و با توجه به مقاومت کششی و فشاری مطلوب این مصالح در سطح وسیع متداول گردیده است. با توجه به فزونی بهای تولید، معمولاً نیمرخ های فولادی دارای ضخامت ناچیز بوده و در نتیجه علاوه بر مسئله زنگ زدن و خوردگی، خطر بروز ناپایداری های الاستیک نیز همواره موجود می باشد، از طرف دیگر نظر به اینکه با افزایش طول دهانه وزن مرده پل ها به سرعت افزایش می یابد، با توجه به ناچیز بودن ابعاد و در نتیجه سبک بودن مقاطع فلزی، هنوز نیز برای احداث پل های جدید کاربرد دارد.

۲-۲-۴-۱- پوشش پل های فلزی

پوشش پل های فلزی را می توان از چوب، مصالح سنگی، بتن مسلح و یا از ورق های فلزی انتخاب نمود. استفاده از چوب برای پوشش پل ها در زمانهای بسیار قدیم رایج بوده اما امروزه به ندرت مورد استفاده قرار



می گیرد. همچنین در طرح های جدید از پوشش مصالح سنگی نیز بعلت وزن زیاد آن، کمتر استفاده می شود. در این راه حل تیرهای حمال طولی پل بوسیله قوس هایی از آجر و مصالح سنگی به هم متصل می شوند. در پوشش بتن مسلح از یک دال بتن مسلح که روی تیرچه های طولی و تیرهای عرضی پل تکیه نموده تشکیل یافته است. پوشش بتن مسلح مقاومت و صلبیت لازم را به سازه داده و از نظر اجرائی نیز آسان و بسیار متداول می باشد.

در پوشش فلزی از یک سری صفحات فلزی که بوسیله بتن مسلح پوشیده شده و روی بال فوقانی تیرچه طولی جوش شده اند تشکیل شده است. ضخامت کل حاصله معمولاً ضعیف (بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر) است. یکی دیگر از انواع پوشش های فلزی متداول دال ارتوتروپ است. این پوشش از یک صفحه فلزی که در جهت عمودی بوسیله ورق های ساده یا جعبه ای تقویت شده تشکیل یافته است، صفحه فلزی نقش بال فوقانی تیرها را به عهده داشته و ضمن شرکت در مقاومت خمشی بارهای موضعی حاصل از چرخ و سائل نقلیه را نیز تحمل می کند. ضخامت آن معمولاً حدود ۱۲ میلیمتر (برای جان جعبه ای) تا ۱۴ میلی متر (برای جان ساده) می باشد. دال ارتوتروپ در مجموع روی اجزاء اصلی پل (تیرهای طولی و عرضی) تکیه می کند.

۲-۲-۴-۲- طبقه بندی پل های فلزی

پل های فلزی را میتوان با توجه به نوع سیستم باربر به شرح زیر طبقه بندی نمود :

- پل با تیرهای حمال
- پل قوسی
- پل با کابل های باربر



۲-۲-۴-۱- پل تیرهای حمال

این پلها از متداول ترین انواع مورد استفاده برای دهانه های متوسط (تا ۲۵۰ متر) می باشند. تیرهای حمال معمولاً بصورت شبکه های فلزی مقاطع جعبه ای یا تیرهای مرکب تو پر ساخته شده و تغییر شکل بسیار محدودی خواهند داشت. شبکه های فلزی معمولاً سبک بوده اما با توجه به خصوصیات ظاهری آنها، کمتر در مناطق شهری مورد استفاده قرار می گیرند. در حالت کلی این پلها را نیز می توان به شرح زیر تفکیک نمود:

پل با تیرهای حمال جانبی : در این حالت تیرهای حمال جانبی معمولاً از شبکه های فلزی تشکیل شده و اجزاء اصلی باربر تابلیه می باشند. در شرایطی که عرض پل محدود باشد (کمتر از ۱۴ متر) می توان از این سیستم استفاده نمود.

پل با تیرهای حمال تحتانی: در این حالت تیرهای حمال عموماً از نوع تیرهای مرکب با جان توپر (که از چند ورق فلز با اتصال پیچ پرچ یا جوش تشکیل شده اند) می باشند. تیرهای حمال با ارتفاع ثابت یا متغیر ساخته شده و در نتیجه ضمن حصول منظره مناسب صرفه جوئی مهمی نیز در مصرف مصالح خواهد شد. همچنین در بعضی شرایط می توان سبستم متشکل از تیرها یا حمال تحتانی را با یک مقطع جعبه ای جایگزین نمود.

۲-۲-۴-۲- پل قوسی

پل قوسی، پلی با تکیه گاه های انتهائی در هر طرف است که شکلی نیم دایره مانند دارد. پلی که از رشته ای از قوس ها تشکیل شده باشد، پل درهای نامیده می شود. پل قوسی ابتدا توسط یونانی ها و از سنگ ساخته شد. بعدها، رومیان باستان از ملات در پل های قوسی خود استفاده کردند. با توجه به اصول مقاومت مصالح، شعاع قوس و ابعاد این پلها را طوری انتخاب می کنند که بارهای قائم وارده تبدیل به یک نیروی فشاری در امتداد قوس شود. بنابراین در مناطقی با کیفیت خاک مناسب، میتوان دهانه های بزرگ (تا حدود ۵۰۰ متر) را با پل های قوسی طی نمود.



۲-۲-۴-۳- پل ترکه‌ای

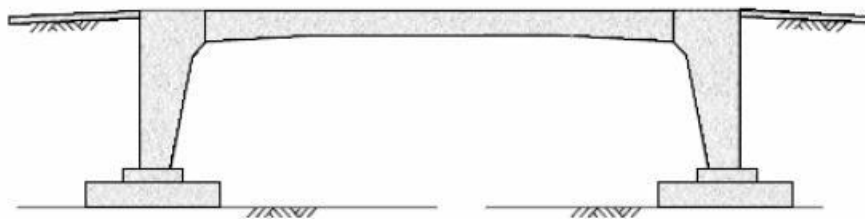
در این پل‌ها، تابلیه بصورت یک صفحه صلب از یک طرف روی پایه‌های کناری (کوله‌ها) و دو پایه بلند میانی و از طرف دیگر بطور الاستیک روی کابل‌های مورب تکیه نموده است. این کابل‌ها در تمام طول پل گسترش می‌یابند. بار وارده را به پایه‌های بلند میانی منتقل می‌نمایند. کابل‌های ذکر شده را می‌توان در دو صفحه قائم و بطور موازی در دو طرف تابلیه قرار داده و یا در جهت عرضی نیز بطور مورب و در امتداد محور طولی پل به پایه میانی متصل نمود.

همچنین در بعضی شرایط می‌توان از یک مجموعه کابل که در امتداد محور طولی پل قرار می‌گیرند استفاده نمود. پایه‌های میانی پل به شکل A, I یا H طرح شده و معمولاً از فولاد یا بتن مسلح می‌باشد، پل‌های ترکه‌ای به تعداد زیاد و تا دهانه ۵۰۰ متر ساخته شده‌اند.

۲-۳- انواع پل‌های بدون درز

۲-۳-۱- اثر حرارت در سازه پل‌ها

روش رایج و متداول طراحی و ساخت پل‌ها بدین صورت است که قسمتی به اسم روسازه (شامل عرشه و تیرها آن) را از قسمت انتهایی خود بر روی زیرسازه (کوله و یا پایه میانی) قرار می‌دهند. در حالت کلی، در حد وسط دو کوله با توجه به طول پل، چندین پایه میانی نیز می‌تواند وجود داشته باشد. بدلیل تغییرات فصلی درجه حرارت محیط، قسمت روسازه نیز مصون از این تغییرات دما نیست. این تغییر حرارت باعث تغییر در ابعاد عرشه بخصوص طول آن میشود. در عین حال این تغییرات دما تغییر خاصی در ابعاد سایر اجزای پل نظیر زیرسازه ندارد. علت این امر را چنین میتوان توضیح داد که این قسمتها معمولاً در درون خاک قرار دارند و متاثر از این تغییرات دما نیستند و یا اینکه طول قابل ملاحظه‌ای ندارند که نسبت به تغییرات دما حساس باشند. عامل تغییر طول عرشه پل، تحت تاثیر تغییرات درجه حرارت محیط، انرژی حرارتی خورشید است و بارهای خارجی نقشی در ایجاد آن ندارند.



شکل (۳-۲): مدل شماتیک پل یکپارچه

۲-۳-۲- سیستم های دارای درز انبساط

علی رغم رشد روز افزون سیستم یکپارچه در ساخت پل هایی با دهانه ۳۰۰ متر و بیشتر، هنوز به جهت نو بودن آنها و عدم شناخت مهندسین، اکثر پل ها طوری طراحی می شوند که امکان جابجایی آنها در حد فاصل روسازه و کوله فراهم شود. در فضاهای خالی تعبیه شده درز انبساط قرار می گیرد که با آب بندی آنها از خرابی قسمت های بتنی و فولادی جلوگیری می شود. البته استفاده از درز انبساط مشکلاتی را هم به دنبال دارد. در طراحی درزهای انبساط باید ضربات شدید ناشی از بارهای ترافیکی، تغییرات آب و هوایی، تابش خورشید، نفوذ آب، آلودگی، و مسائلی نظیر اینها را نیز در نظر گرفت. عملکرد درزهای انبساط بخصوص دوام و طول عمر آنها مشکل اساسی کاربرد این درزها در جهان بوده است، بطوری که شکست آنها خسارت فراوانی را برای وسایل نقلیه و سازه پل به همراه داشته است. در سال های اخیر تلاش های زیادی جهت بالا بردن طول عمر و دوام درزهای انبساط انجام گرفته است لیکن کماکان این درزها مشکل زا هستند.

درز انبساط صرف نظر از نوع و کاربرد آن بایستی دارای یک سری شرایط و خصوصیات کلی باشد. این

شرایط کلی عبارت اند از:

۱- تحمل بارهای ترافیکی در تمام جهات و قابلیت تطابق کامل با جابجایی هایی که عواملی نظیر تغییرات

حرارتی، خزش، جمع شدگی بتن، نشست تکیه گاه ها و بارگذاری دینامیکی باعث ایجاد آنها می شود. درز انبساط

باید طوری نسبت به این عوامل واکنش نشان دهد که هیچ نوع تنش بیش از حد مجاز در اتصالات و اعضای

سازه های بوجود نیاید.



۲- فراهم آوردن یک رانندگی راحت و آسوده و عدم ایجاد مشکل برای تمامی انواع مسافرین اعم از رانندگی وسایل نقلیه، دوچرخه سواران و عابرین پیاده.

۳- عدم ایجاد سروصدا و لرزش در هنگام عبور وسایل نقلیه.

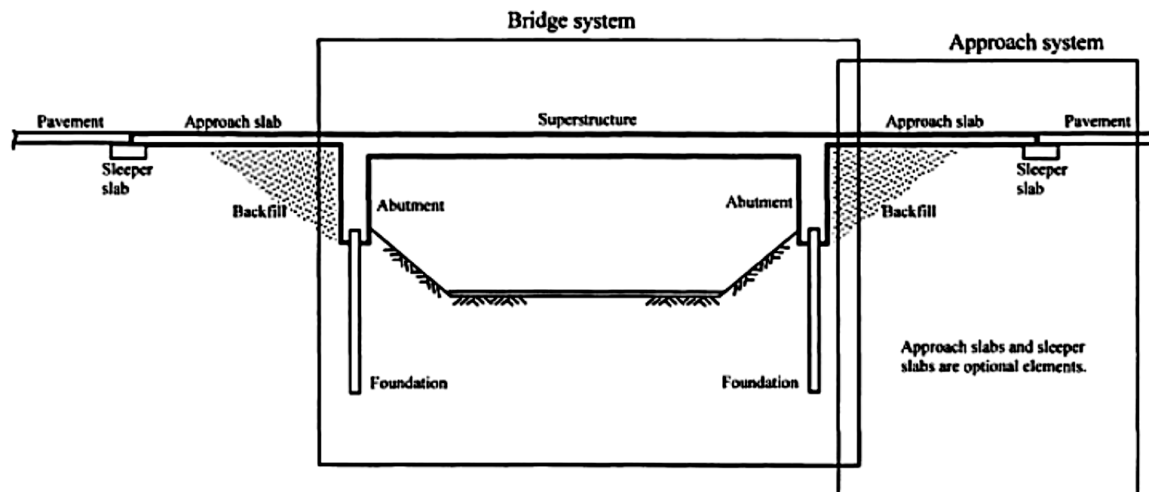
۴- آببند بودن کامل و زهکشی مناسب جهت هدایت آب و مواد مضر برای بتن و تکیه‌گاه‌ها. تمامی عرشه‌ها باید دارای سیستم زهکشی باشند. با این وجود خود درزهای انبساط نیز باید به سیستم زهکشی جهت هدایت آب مجهز باشند. با توجه به صلاحدید طراح، درزهای انبساط باید دارای سیستم هدایت آب ثانویه‌ای در زیر درز انبساط باشند.

۵- عدم خرابی و شکست ناگهانی و ایجاد خطر برای وسایل نقلیه.

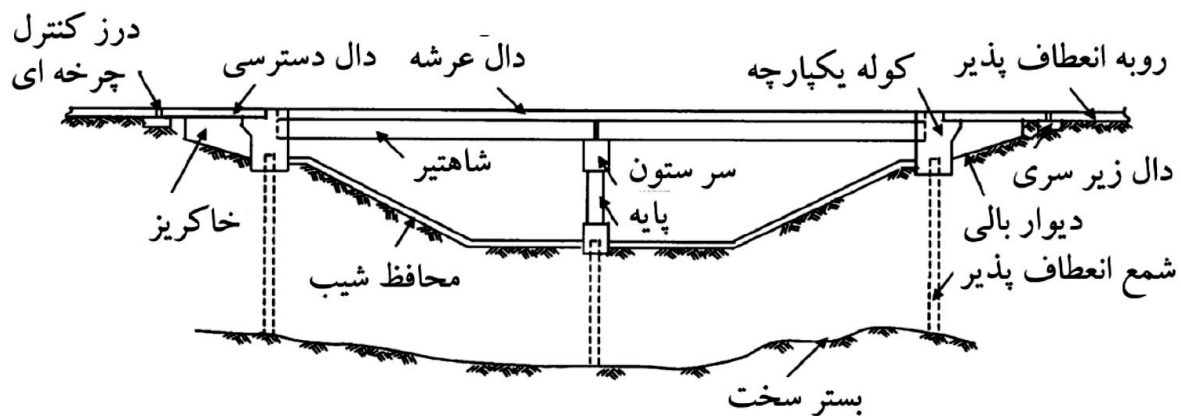
۶- سهولت امر نظارت و نگهداری بخصوص از قسمت زیرین عرشه پل و دسترسی آسان جهت تعویض قطعات در صورت نیاز.

۷- در انتخاب مصالح باید در مورد کیفیت و مشخصات آنها در تطابق با استانداردهای ملی و جهانی دقت نمود. مصالح باید طوری باشند که دیگر نیازی به نگهداری و نظارت آنها حین بهره‌برداری از پل نباشد. مصالح بکار رفته باید در برابر خوردگی و سایش و ضربه مقاومت لازم را دارا باشند.

۸- هنگام نصب درزهای انبساط باید دقت نمود که سطح تمام شده درزهای انبساط به مقدار کمی پایین‌تر از سطح جاده باشد. هم سطح بودن جاده و درز انبساط اشکالی ندارد ولی هیچ‌گاه نباید درز انبساط از سطح جاده بیرون زده باشد. همچنین فضاهاى خالی درز باید عاری از هرگونه آلودگی باشد.



شکل (۲-۴): هندسه ساده شده پل های یکپارچه



شکل (۲-۵): اجزا و قسمت های تشکیل دهنده پل های یکپارچه

در انتخاب درز انبساط نیز مساله از چندین وجه بررسی می شود. در هنگام این انتخاب کاربر باید مساله هزینه ساخت، نگهداری، و حتی تعویض پس از ساخت را در نظر بگیرد. در هنگام طرح پل و درز انبساط باید این انتخاب بصورتی باشد که امکان بازرسی و نظارت درز انبساط و سایر اجزای آن به سادگی میسر باشد. علاوه بر ملاحظات اقتصادی و نظارتی عوامل فنی دیگری از دید مهندسين طراح در انتخاب درز انبساط مدنظر قرار میگیرند که مهمترین آنها عبارت اند از:

۱- حجم ترافیک



۲- سرعت مجاز

۳- تغییرات شرایط جوی

۴- احتمال توقف های طولانی و ایست کامل ترافیک

۵- شعاع خم

۶- حداکثر زوایه (بیه) پل

۷- حداکثر شیب طولی پل

۸- عرض، طول، و عمق محل نصب درز انبساط

۹- تعداد جابه جایی های رفت و برگشتی ترافیک

۱۰- ملاحظات زیست محیطی

۱۱- مسایل زهکشی

۲-۳-۳- سیستم های بدون درز

سیستم هایی بدون درز سیستم هایی هستند که درز انبساط را بر روی سطح عبور حذف می کرده و امکان جابجایی را از طریق دیگری برای پل مقدور می سازند. متداول ترین این سیستم ها در جهان بطور کلی شامل سیستم کوله یکپارچه، آسفالت روکشی و دال وصله می باشند. سیستم کوله یکپارچه امکان جابجایی را از طریق اندرکنش خاک و سازه تامین می کند. آسفالت روکشی این امکان را با انعطاف پذیری مخلوط آسفالت پلیمری مقدور می سازد. در سیستم دال وصله، جابجایی در تیر جایز است ولی دال ممتد بوده و برای تنش های وارده باید طراحی شود.



۲-۴- سیستم یکپارچه کوله و عرشه

این سیستم در کشورهای مختلف به نام های مختلف پل یکپارچه، کوله های یکپارچه، پل های بدون درز، پلهای با قاب صلب شناخته می شوند. پل های یکپارچه هنوز در ایران مورد استفاده وسیع قرار نگرفته اند و اگر هم تعدادی از این نوع پل در ایران ساخته شده باشد بصورت موردی بوده است. این در حالی است که در کشورهای پیشرفته و بخصوص ایالات متحده آمریکا و کانادا این نوع پل روز به روز کاربرد گسترده تری می یابد. بطوری که پل های با طول ۳۵۸ متر هم به صورت یکپارچه ساخته شده اند و هم اکنون بیش از ۱۵۰۰۰ پل با عرشه پیوسته در سراسر آمریکا و کانادا وجود دارد.

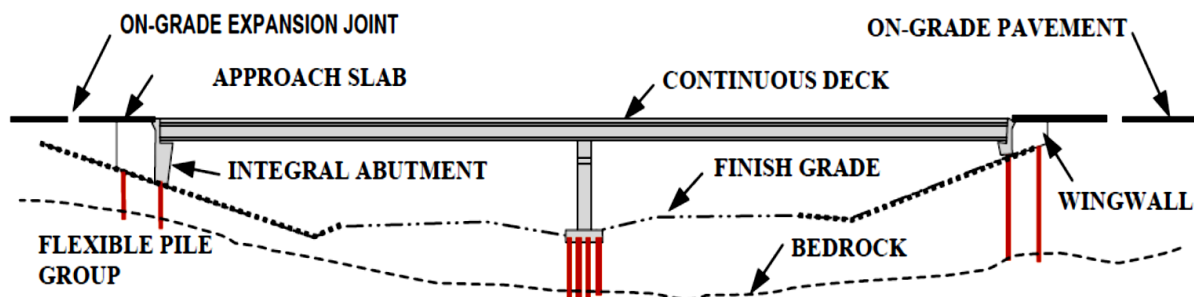
ساخت اولین پل با این روش در آمریکا به سال ۱۹۳۰ باز می گردد. اما در سال های ابتدایی دهه ۹۰ با روشن شدن بیش از پیش مزایای این گونه پل ها، پل های بیشتری به این روش ساخته شد و ساخت پل به روش پیوسته رونق گرفت. در انگلستان مطابق آیین نامه اداره راه (BA42) تمامی پل های با دهانه زیر ۶۰ متر اجباراً باید بصورت یکپارچه طرح شوند. با توجه به استفاده گسترده از این نوع پل در سطح جهانی و نیز مزایای بسیار آنها نسبت به پل های معمولی نیاز به ساخت این نوع پل در کشور احساس می شود. اما دانش فنی ساخت این نوع پل در ایران به اندازه کافی گسترش نیافته است.

۲-۴-۱- کوله نیمه یکپارچه

علاوه بر نوع یکپارچه، نوع دیگری موسوم به سیستم کوله نیمه یکپارچه نیز وجود دارد. تفاوت این سیستم با سیستم تمام یکپارچه استفاده از دستگاه تکیه گاهی و کوله کوتاه است. همانطور که دیده می شود در این سیستم نیز قسمت مشکل ساز درز انبساط حذف شده است. در سیستم نیمه یکپارچه، عرشه پل توسط تکیه گاه هایی (معمولاً نئوپرن) بر روی کوله سوار میشود و امکان جابجایی را فراهم میکند. هر چند در این سیستم تکیه گاه ها کماکان وجود دارند، اما دیگر مشابه روش های مرسوم از درزهای انبساط در قسمت فوقانی دستگاه تکیه گاهی که مساله طول عمر آنها یکی از مشکلات عمده آنها بود استفاده نمی شود، مزیت سیستم



نیمه یکپارچه نسبت به کاملاً یکپارچه این است که تغییرات حرارتی کوله در سیستم نیمه یکپارچه بسیار ناچیز است.



شکل (۲-۶): مدل شماتیک پل باربر جاده ای بدون درز انبساط با تکیه گاه یکپارچه

سیستم یکپارچه نیز به نوبه خود مشکلاتی دارد که ناشی از حرارت است و برای هر سیستمی وجود دارد. فقط تفاوت در اینجاست که در این حالت مشکلات از نوع سازه ای (روسازه) به نوع ژئوتکنیکی (خاکی) تبدیل شده است. مشکل مزبور به اندرکنش بین کوله و خاک مجاور آن بر اثر تغییر طول حرارتی پل باز می گردد. همراه با تغییر طول عرشه و فشار به کوله پل، خاک پشت کوله فشرده و بعد رها می شود. عمده حرکت کوله بصورت چرخش حول انتهای آن است؛ اما در عین حال مقداری جابجایی افقی را نیز به همراه دارد. این جابجایی ها در قسمت بالایی کوله می تواند به ده ها میلی متر برسد. در پایان هر دوره گرما و سرما فاصله کوله و خاک پشت آن کمی بیشتر می شود. این مقدار برای عرشه های بتنی ساخته شده از سیمان پرتلند بدلیل پدیده جمعشدگی بتن افزایش هم می یابد و اوضاع بدتر می شود.



شکل (۷-۲): نمونه اجراء شده پل نیمه یکپارچه

۲-۴-۲- انواع مختلف کوله های پل یکپارچه

۱- کوله قابی

۲- کوله قابی

۳- کوله مدفون

۴- کوله سطحی کناری

۵- کوله پرده ای کناری

۶- کوله پرده ای کناری

۲-۴-۲-۱- مزایای پل های با کوله یکپارچه

کوله های یکپارچه درز انبساط مابین عرشه و دیوار کوله را با یک بتن ریزی یکپارچه حذف می کنند. نبود این درز کلیه مسائل مرتبط با آن را که شامل ریزش آب به عناصر زیر پل و هزینه تعمیر لاستیک های درزگیر و غیره را در بر دارد از بین می برد. لیکن عرشه دیگر آزادی انبساط و انقباض حرارتی ندارد و کلیه



تنش های حرارتی توسط سازه باید تحمل شود. در عین حال حذف دستگاه های تکیه گاهی، که هزینه خرید و نگهداری بالایی دارند، جبران کننده کلیه هزینه های مرتبط با یکپارچه سازی است، لذا مهندسين با تجربه در این امر متفق القول هستند که کوله های یکپارچه گزینه اقتصادی تری از پل های با درز معمولی اند. سایر مزایای پل های با عرشه پیوسته نسبت به پل های معمولی به شرح زیر است:

۱- هزینه اولیه کمتر. بعلت عدم استفاده از درز انبساط و نیز تکیه گاه های الاستومری، هزینه های اولیه پل های با عرشه پیوسته نسبت به پل های معمولی کمتر است.

۲- هزینه های نگهداری کمتر. بعلت حذف تکیه گاه های الاستومری و درز های انبساط که از پرخرج ترین اعضای سازه پل از نظر هزینه نگهداری هستند، هزینه نگهداری پل به مراتب کمتر می شود. حذف درز انبساط باعث عدم بروز مشکلاتی نظیر خوردگی، نشست آب و امکان کج شدن پایه ها بعلت حرکت درز می شود.

۳- عملکرد لرزه ای بهتر. با توجه به پیوستگی این نوع پل، در هنگام زلزله از خرابی هایی مانند افتادن عرشه از روی زیرسازه، تغییر شکل نسبی زیاد بین روسازه و زیرسازه و کج شدن غیرهمسان پایه ها که از خرابی های معمول هستند، جلوگیری می کند.

۴- حذف دستگاه های تکیه گاهی و بولت های نگهدارنده آن که باعث سرعت اجرا و افزایش رواداری اجرایی می شود.

۵- تردد بدون صدا و ضربه خودروها از روی پل

۶- رفع نفوذ آب و خاک به زیر پل

۷- کاهش امکان غیرشاقول شدن پایه های میانی

۸- افزایش باربری در جهت قائم به سبب پخش بهتر بار و نامعین بودن سازه

۹- افزایش مقاومت در مقابل نیروهای بلند کننده تکیه گاهی



۱۰- افزایش طول دهانه میانی در پل های سه دهانه ممتد

۱۱- در پل های معمول حرکت درز انبساط بعثت تغییرات دما و نشست نابرابر پایه ها باعث ایجاد دست-انداز و موج در روسازه می شود، که این اشکال در پل های با عرشه پیوسته وجود ندارد.

۱۲- کاهش تعداد شمع های فونداسیون نسبت به پل های معمولی

۱۳- وجود ظرفیت رزرو بیشتر که باعث مقاومت بیشتر در برابر بارهای غیرمعمول، نسبت به پل های معمولی می شود.

۲-۴-۳- مشکلات پل های با کوله یکپارچه

بطور کلی دو مساله اساسی پدید آمده از این تغییرات حرارتی سیستم کوله و عرشه یکپارچه را با مشکل مواجه می کند.

اولین مشکل که در دهه ۱۹۶۰ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت مساله تنش های افقی اعمالی از خاک به کوله در اثر این تغییرات حرارتی بود. در فصل گرما طول عرشه پل به بیشترین مقدار ممکن رسیده و بخصوص در قسمت بالایی، کوله را به سمت خاک پشت آن میراند. این جابجایی می تواند در حدی باشد که خاک از حالت سکون خود گذشته و به مرحله فشار مقاوم برسد و در نتیجه نیروی افقی وارد به کوله از مقدار مدنظر طراحی فراتر رود. در نهایت این امر ممکن است به ترک خوردگی و شکست کوله بی انجامد.

این امر از جهات دیگر نیز مشکل ایجاد می کند. با حرکت افقی کوله و دور شدن آن از خاک مجاور در فصل سرما و یا جمع شدگی بتن، بخشی از خاک مجاور که حالت گوه ای دارد به سمت کوله جابجا می شود. وقتی که قسمت روسازه در فصل گرما افزایش طول میدهد و کوله را به سمت خاک فشار می دهد، خاک دوباره به وضعیت و محل قبلی خود بر نمیگردد و ربطی به نوع خاک و روش تثبیت آن ندارد. لازم به ذکر است که در پایان هر دوره گرما و سرما در نهایت خاک کمی به سمت کوله جابجا شده و در دوره گرمای بعدی کوله



فشار بیشتری را متحمل می‌شود. بدلیل افزایش سالیانه این فشار از سوی خاک ممکن است پس از چند سال شکست کوله اتفاق بیفتد. این پدیده تحکیم مکرر نامیده می‌شود.

مشکل دوم، ناشی از این جابجایی‌های حرارتی، از دهه ۱۹۹۰ مورد بررسی قرار گرفت. با دور شدن کوله از خاک، خاک در تراز عرشه پل مقداری نشست می‌کند. این مسئله به دو صورت مطرح می‌شود. یکی آنکه اگر در محل اتصال پل و خاک پشت آن پیش دال وجود داشته باشد، به مرور خاک زیر آن نشست کرده و در اثر ترافیک میتواند دچار خمشی شود. اگر در محل اتصال پل و خاک پشت آن این پیش دال وجود نداشته باشد، در این محل اختلاف سطح بوجود آمده و ترافیک را مختل می‌کند. نکته مهم آن است که حتی اگر مقداری جزئی خاک نشست کند دال ورودی تماس خود را با خاک از دست میدهد و در این صورت باید با تخمین صحیح مقدار نشست، پیش دال را تقویت کرد.

در مواجهه با مشکلات فوق، با یک سری واقعیت‌ها مواجه هستیم که به شرح زیر است:

۱- این امکان برای هر پلی باید فراهم باشد تا با توجه به تغییرات دمایی جابجا شده و مانع ایجاد تنش‌های جدید حرارتی در آن شود. در سیستم یکپارچه کوله و عرشه بر خلاف سیستم دارای درز انبساط، کوله و عرشه هر دو باید حرکت کنند.

۲- خاک پشت کوله بطور مستقیم از این تغییرات حرارتی متاثر نمی‌شود. بنابراین بایستی به طریقی از حرکت آن جلوگیری شود تا باعث نشست خاک در زیر دال ورودی نشود. در سیستم‌های دارای درز انبساط خود به خود با عدم حرکت کوله خاک پشت آن را به طریقی ثابت نگهداریم و خاک تمایلی به سکون ندارد. چرا که طبیعت خاک چنین است که در شیب‌های قائم پایدار نیست. بنابراین خاک باید به طریقی مثلاً با ژئوسنتتیک‌ها مسلح شود.

۳- امکان حرکت نسبی خاک و پل باید به طریقی فراهم شود. در پل‌های معمولی این وظیفه بر عهده درز انبساط است. در سیستم‌های جدید نیز درزهای انبساط ژئوتکنیکی باید در حد فاصل کوله و خاک پشت آن تعبیه شوند. خالی گذاشتن این فاصله گزینه قابل قبولی نیست.



۴- باید به طریقی جلو افزایش دورهای نیروی وارده به کوله از طرف خاک را که ناشی از پیشروی خاک به سمت کوله هست را گرفت. در نظر گرفتن این افزایش نیرو در طراحی کوله گزینه مقرون به صرفه‌ای نیست.

۲-۵- نمونه‌هایی از پل‌هایی یکپارچه

در زیر طول پل‌های یکپارچه با کوله‌های کوتاه در ایالت‌های مختلف متحده آمریکا بصورت موردی شرح داده شده است.

جدول (۲-۱): پل‌های یکپارچه با کوله‌های کوتاه در ایالت‌های مختلف متحده آمریکا

ایالت کشور آمریکا	کل تعداد ساخته شده	سال اولین پل ساخته شده	سال آخرین پل ساخته شده	طول تیر فلزی (m))	طول تیر بتنی (m))	تیر بتن مسلح (m))
AK	۵۰	۱۹۷۵	۱۹۹۵	-	۴۱/۲	-
AZ	۵۰	۱۹۷۵	۱۹۸۵	-	-	-
AR	۲	۱۹۹۶	۱۹۹۶	۹۰/۹	-	-
CA	هزاران	۱۹۵۰	۱۹۹۵	-	-	۱۲۲/۰
CO	۱۶۴۳	۱۹۰۵	۱۹۹۶	۳۱۸/۴	۳۳۹/۲	۲۹۰/۴
GA	۲۵	۱۹۷۵	۱۹۹۲	۹۱/۵	-	۱۲۵/۱
IL	۳۵۰	۱۹۸۳	۱۹۹۶	۶۱/۰	۹۱/۵	۳۶/۶
IA	صدها	۱۹۶۲	۱۹۹۶	۸۲/۴	۱۵۲/۵	۴۱/۲
KS	۱۰۰۰	۱۹۳۵	۱۹۹۶	۱۳۶/۸	۱۲۶/۴	۱۷۷/۶

KY	۲۶۰	۱۹۷۰	۱۹۹۶	۸۹/۱	۱۲۲/۰	۳۱/۷
ME	۱۸	۱۹۸۳	۱۹۹۴	۵۷/۳	۴۵/۸	۲۹/۳
MD	۱۸	۱۹۸۶	۱۹۹۶	-	۱۵/۹	-
MA	۲۰	۱۹۳۰	۱۹۹۶	۱۰۶/۸	۸۴/۸	۴۳/۹
MI	۶	۱۹۹۰	۱۹۹۶	-	۱۴۷/۹	-
MN	نامعلوم	۱۹۵۸	۱۹۹۶	۵۳/۴	۵۳/۴	۳۰/۵



NV	خیلی	۱۹۸۰	۱۹۹۶	۷۷/۸	۳۳/۶	۸۴/۲
NH	۲	۱۹۹۳	۱۹۹۶	۴۵/۸	۲۴/۴	-
NY	۱۵۵	۱۹۸۰	۱۹۹۶	۹۳/۳	۶۸/۳	-
ND	۶۰۰	۱۹۶۰	۱۹۹۶	۱۲۲/۰	۱۲۲/۰	۴۸/۸
NS	۲	۱۹۸۶	۱۹۹۶	-	۳۸/۰	-
OK	۵۰	۱۹۸۰	۱۹۹۶	-	۹۱/۵	-
OR	نامعلوم	۱۹۴۰	۱۹۹۶	-	۳۳۵/۵	-
PA	۵۰	۱۹۴۶	۱۹۹۶	۱۲۲/۰	۱۸۳/۰	-
QC	۱	۱۹۸۸	۱۹۸۸	-	۷۸/۱	-
SD	۸۱۸	۱۹۴۸	۱۹۹۶	۱۱۲/۹	۲۰۹/۲	۱۰۶/۸
TN	۱۰۰۰	۱۹۶۵	۱۹۹۶	۱۷۵/۴	۳۵۸/۴	۱۸۹/۱
VT	۱۰	۱۹۷۵	۱۹۹۳	۲۴/۴	-	-
VA	۲۵	۱۹۸۲	۱۹۹۶	۹۷/۶	۲۳۵/۵	-
WA	۱۰۰۰	۱۹۶۵	۱۹۹۶	-	۱۸۳/۰	۶۱/۰
WV	۶۰	-	۱۹۹۳	۹۷/۶	۱۳۷/۳	۳۳/۶
WY	۱۴۵۸	۱۹۵۷	۱۹۹۶	۱۰۰/۰	۱۲۷/۰	۹۹/۰

۲-۶- عملکرد شمع های فولادی H شکل در پل های یکپارچه با کوله کوتاه تحت اثر تغییرات حرارتی

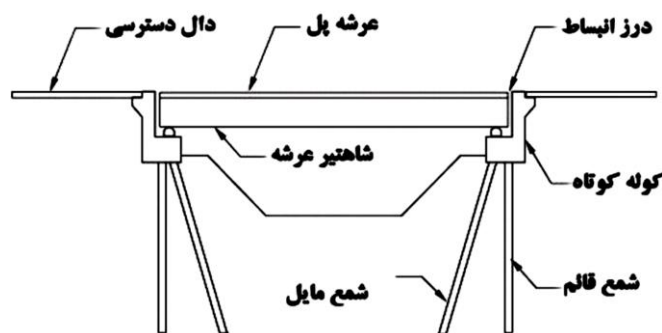
شمع های بکار رفته در پل های یکپارچه اکثراً شمع های فولادی H شکل می باشد. تحت اثر تغییرات حرارتی، این شمع ها دچار جابجایی های چرخه ای خواهد شد که میزان تحمل شمع ها در برابر این جابجایی ها بستگی به کمانش صفحات بال و جان و نیز گسیختگی ناشی از خستگی خواهد داشت. در پل های یکپارچه، عرشه پیوسته و بدون درز انبساط بوده و بصورت صلب و یکپارچه به کوله متصل می گردد؛ در حالی که در پل های متعارف در روی عرشه و نیز محل اتصال عرشه کوله از درز انبساط استفاده می شود.

در پل های یکپارچه اتصال پیوسته عرشه و کوله توسط قالب بندی و بتن ریزی انتهای عرشه و کوله انجام می پذیرد. در پل های متعارف کوله ها روی تکیه گاه هایی از نوع شمع های قائم و مایل قرار می گیرند ولی در پل های یکپارچه فقط تک ردیفی از شمع های قائم در زیر کوله قرار دارند. این نحوه قرارگیری شمع ها در پل های یکپارچه باعث خمش پذیری جانبی زیاد آنها در برابر جابجایی های طولی عرشه خواهد شد.

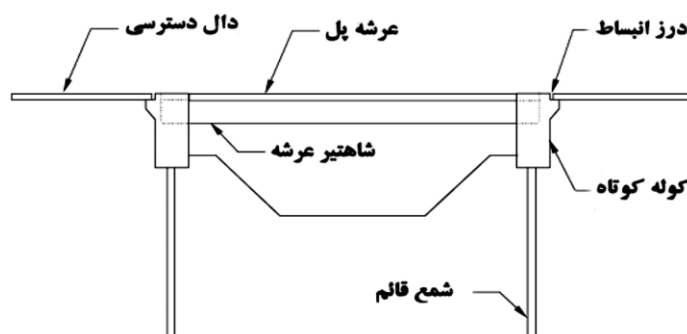


مهندسين طراح پل های يکپارچه بایستی نیروی اعمالی به کوله ها و شمع ها را مورد ارزیابی دقیق قرار دهند تا بدین ترتیب انعطاف پذیری لازم برای شمع های تحت اثر جابجایی های طولی عرشه حاصل گردد؛ زیرا ساخت يکپارچه عرشه و کوله باعث اعمال یکسری تنش ها و کرنش ها اضافی روی اجزا تشکیل دهنده پل می گردد که این تنش ها از انبساط و انقباض ناشی از تغییرات حرارتی عرشه و عواملی نظیر خزش و افت بتن عرشه ایجاد می گردد. البته جابجایی های طولی ناشی از تغییرات حرارتی به مراتب بزرگتر از عوامل نظیر افت و خزش بوده و بایستی اثرات ناشی از آن بر روی اجزا پل مخصوصاً شمع ها مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

بزرگی این جابجایی ها تابعی از تغییرات حرارتی، طول و نوع پل و نوع مصالح روسازه می باشد. وقتی طول پل های يکپارچه افزایش یابد، جابجایی های چرخه ای ناشی از تغییرات حرارتی نیز زیاد می شود؛ در نتیجه شمع ها ممکن است دچار تغییر شکل های پلاستیک شده و عمر سرویس دهی آنها بخاطر خستگی در چرخه های پایین کاهش یابد؛ بنابراین پل های يکپارچه را نمی توان در هر طولی ساخت. نمونه دو پل يکپارچه بدون درز انبساط و پل متعارف درز دار در شکل های (۲-۸) و (۲-۹) نشان داده شده است.



شکل (۲-۸): پل تک دهانه متعارف با درز انبساط





شکل (۲-۹): پل تک دهانه یکپارچه بدون درز انبساط

شمع‌های با مقطع H شکل در پل‌های یکپارچه مخصوصاً پل‌های یکپارچه طولی تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. Arsoy آزمایشاتی را بر روی شمع‌های فولادی H شکل، شمع‌های فولادی با مقطع لولهای شکل و شمع‌های بتنی پیش‌تنیده انجام داد. نتایج آزمایشات وی نشان داد که در بین شمع‌های آزمایش شده، شمع‌های فولادی H شکل بهترین گزینه برای پل‌های یکپارچه می‌باشد. ظرفیت جابجایی اعضای فولادی توسط ناپایداری کمانشی آنها تعیین می‌گردد. آزمایش شمع‌های کوبیده و خاک سست آشکار کرد که شمع‌ها قادر به رسیدن به ظرفیت پلاستیک قبل از هر گونه کمانش هستند. شمع‌های فولادی H شکل در پل‌های یکپارچه بوسیله خاک پیرامونی نگهداری می‌شود و در طول خود دارای اتکای جانبی است، بنابراین نیازی به بررسی ناپایداری کمانشی کلی و یا کمانش جانبی - پیچشی نیست. کمانش موضعی تنها نوع ناپایداری است که موقع تعیین ظرفیت جابجایی شمع‌های فولادی H شکل بایستی تعیین گردد و برای جلوگیری از وقوع این کمانش باید نسبت عرض به ضخامت بال محدود شود.

۲-۶-۱- جابجایی چرخه‌ای شمع‌های فولادی تحت اثر تغییرات حرارتی

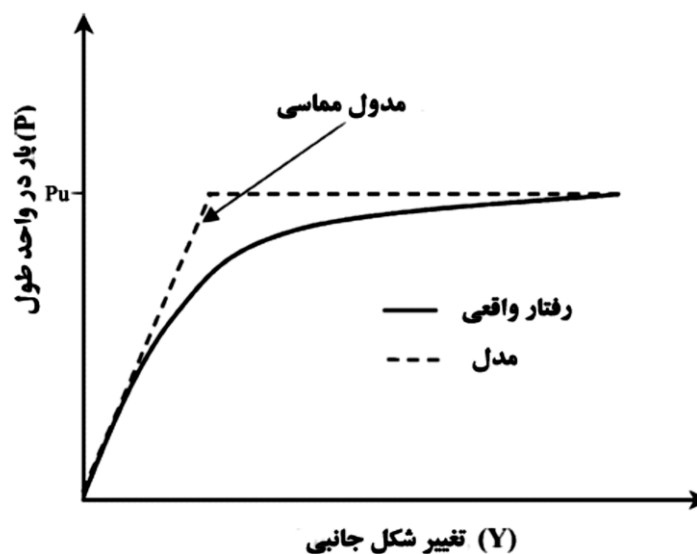
شمع‌های H شکل در معرض جابجایی‌های چرخه‌ای مربوط به تغییرات دمایی روزانه و فصلی هستند. در هر سال به خاطر تغییرات دمایی فصلی (تابستان و زمستان) شمع‌ها ممکن است در معرض یک جابجایی چرخه‌ای موثر قرار گیرند. علاوه بر این شمع‌ها ممکن است در معرض بیشمار جابجایی‌های چرخه‌ای کوچکتر به خاطر نوسانات دمایی هفتگی و یا روزانه قرار گیرند. این مطلب طی بررسی دو پل یکپارچه واقع در ایالت Iowa و گذاشتن گیج بر روی شمع‌های فولادی H شکل و ثبت کرنش در برابر زمان تأیید گردید. شمع‌ها در هر دو پل و در هر سال به خاطر تغییرات دمایی، یک چرخه کرنش بزرگ و حدود ۵۲ چرخه کرنش کوچک اما قابل توجه را متحمل شدند. مجدداً ثبت کرنش در محل نشان داد که دامنه چرخه‌های کرنش کوچک در شمع‌ها بین ۲۰-۴۰ درصد محدوده دامنه کرنش‌های چرخه‌ای بزرگ قرار دارد.



۲-۶-۲- اندرکنش خاک- شمع H شکل

شمع‌های بکار رفته در پل‌های یکپارچه بایستی علاوه بر نیروهای قائم، نیروهای جانبی را نیز تحمل نمایند؛ بنابراین در روند تحلیل، باید شرایط تعادل و اندرکنش خاک- شمع ارضا گردد. در این حالت پاسخ غیرخطی خاک باعث پیچیده‌تر شدن روش حل می‌گردد. اندرکنش شمع- خاک در هر نقطه از طول شمع بوسیله منحنی غیرخطی نیرو- تغییر شکل ($P-Y$) تعریف می‌گردد که در آن P مقاومت جانبی خاک در واحد طول شمع و Y تغییر شکل جانبی است. محاسبه پاسخ نیرو- تغییر شکل جانبی شمع توسط ساخت سری کاملی از منحنی $P-Y$ تعریف می‌گردد که در آن P مقاومت جانبی خاک در واحد طول شمع و Y تغییر شکل جانبی است. محاسبه پاسخ نیرو- تغییر شکل جانبی شمع توسط ساخت سری کاملی از منحنی‌های $P-Y$ در طول شمع است تا پاسخ خاک را مدل نماید.

نمونه‌ای از منحنی غیرخطی $P-Y$ خاک در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. این رفتار غیرخطی می‌تواند با بکار بردن منحنی الاستو-پلاستیک که در همان شکل با خطچین نشان داده شده است، تعریف گردد. قسمت الاستیک در خاک رسی بصورت مدول سکانتی خاک E_s و در خاک ماسه‌ای بصورت مدول اولیه خاک تعریف می‌گردد و قسمت پلاستیک نیز توسط مقاومت نهایی خاک در واحد طول شمع تعریف می‌گردد.



شکل (۲-۱۰): نمودار منحنی $P-Y$



۲-۶-۳- نتایج تحلیل

۲-۶-۳-۱- سختی خاک احاطه کننده شمع‌ها

سختی خاک احاطه کننده شمع‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای روی ظرفیت جابجایی افقی شمع‌ها دارد؛ بطوری که با افزایش سختی خاک ظرفیت جابجایی شمع‌ها و در نتیجه ظرفیت جابجایی پل‌های یکپارچه کاهش می‌یابد.

۲-۶-۳-۲- اندازه و جهت قرارگیری شمع‌ها

با افزایش اندازه شمع، جابجایی پل نیز زیاد می‌شود. دلیل این امر این است که شمع‌های با اندازه بزرگتر، دارای ظرفیت خمشی بزرگتری بوده و در نتیجه برای رسیدن به انحنا خستگی نیاز به جابجایی‌های بزرگتری دارد؛ در نتیجه این شمع‌ها برای رسیدن به گسیختگی ناشی از خستگی، جابجایی‌های افقی بزرگتری را انجام می‌دهد.

همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد که محور خمش و جهت قرارگیری شمع‌ها اثر قابل صرف‌نظری روی ظرفیت جابجایی پل‌های یکپارچه با کوله کوتاه دارد (برای از بین بردن امکان گسیختگی ناشی از رسیدن کوله به ظرفیت خمشی خود استفاده از کوله‌های یکپارچه کوتاه توصیه می‌گردد). این امر در پل‌های یکپارچه با کوله مرتفع‌تر صحیح نمی‌باشد.

۲-۷- فشار وارد بر کوله تحت اثر تغییر طول حرارتی عرشه

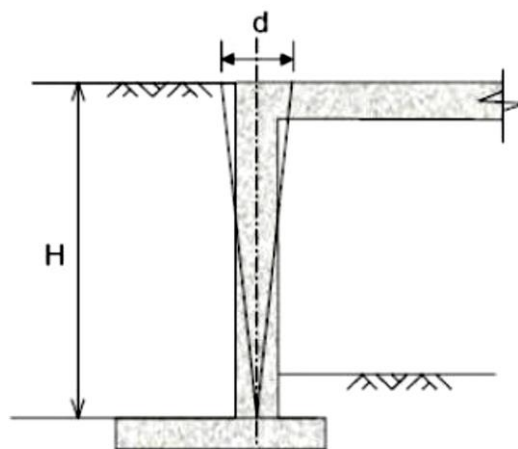
در پل‌ها با سیستم یکپارچه، با توجه به پیوستگی عرشه و دیواره‌های انتهایی و بدلیل تغییر شکل حرارتی عرشه پل، دیواره‌های انتهایی متحمل تغییر مکانهای سیکلی می‌گردند و این تغییر مکانها بر فشار بین کوله و خاک پشت آن تاثیر گذار است. فشار وارد بر دیوارها بستگی به دامنه تغییر مکان و تعداد سیکل حرکات دیواره دارد.



به نحوی که با افزایش دامنه تغییرمکان و با افزایش تعداد سیکل حرکات دیواره، میزان فشار وارده بر دیواره افزایش می‌یابد.

در واقع بدلیل تغییرشکل سیکلی پایههای انتهایی پل که در اثر عواملی نظیر بارهای مرده و زنده، اثر نشست لایه‌ها، خزش و تغییرات حرارتی بوجود می‌آیند، دیوارهای انتهایی متحمل تغییرمکان‌هایی میشوند که در میان این تغییرمکان‌ها تغییرشکل‌های حرارتی عرشه پل، بدلیل تاثیر بسزایی که در رفتار دیوارهای نگهبان انتهایی پل دارند بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این پلها دامنه حرکات دیوارهای نگهبان بستگی به دامنه انبساط طولی عبورگاه پل دارد. به طوری که با مشخص بودن دمای موثر پل، که در نقاط مختلف جغرافیایی قابل تعیین است و با مشخص بودن ضریب انبساط حرارتی سازه پل و طول دهانه، میزان دامنه جابجایی حرکات سیکلی تحمیلی بر دیوار نگهبان قابل محاسبه است.

این حرکات تحمیلی عرشه پل بطور مستقیم بر قسمت فوقانی دیواره وارد می‌شود که با توجه به سختی دیواره و نوع اتصال تکیه‌گاه دیوار با پی آن، باعث تغییرشکل دیوار می‌شود که این تغییرشکل دیوارها، با توجه به سیکلی بودن دمای عرشه پل دارای خصوصیات سیکلی می‌باشند. شکل زیر بعنوان نمونه تغییر طول عرشه و نحوه انتقال این تغییر طول به دیواره انتهایی پل را در حالت دیواره صلب و اتصال مفصلی دیواره به پی نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۱): نحوه انتقال تغییر طول عرشه به دیواره انتهایی پل



بدلیل دوران دیوارهای انتهایی پل‌ها در اثر تغییر طول حرارتی عرشه، فشار خاک وارد بر تکیه‌گاه‌های دو طرف پل افزایش می‌یابد. در واقع این پایه‌ها باید به نحوی طراحی شوند که نیروی بیش از نیروی که در طراحی معمول در نظر گرفته میشود را تحمل نمایند.

جهت بررسی تاثیر میزان دوران دیوار بر فشار وارد بین دیوار و خاک، تحقیقات گسترده آزمایشگاهی صورت گرفته است. در این آزمایشات دیوار نگهبان به شکل صلب و بدون اصطکاک و با اتصال مفصلی به پی در نظر گرفته شده است. تراکم اولیه خاک دانه‌ای مورد آزمایش در تمام آزمایشات $2 / 0 \pm 49/1$ بوده است.

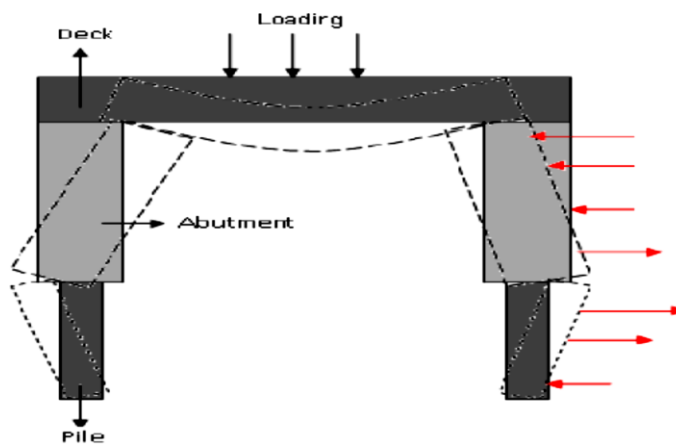
با استفاده از فشارسنج‌های قرار گرفته روی سطح دیوار، میزان فشار وارده در اثر تعداد سیکل‌های بارگذاری ثبت شده و نیز با روش عکسبرداری، باندهای برشی ایجاد شده مشخص گردیده است. بررسی نتایج آزمایشات و کارهای انجام شده توسط محققین دیگر نیز که در این زمینه فعالیت داشتند بیان کننده نتایج مشابهی می‌باشد. در تحقیق دیگری با نصب فشارسنج روی دیواره انتهایی یک پل میزان تغییرات فشار وارد بر دیوار ارزیابی شده است. این بررسی نشان داد که بدلیل حرکات دیوار، فشار وارد روند صعودی داشته و در طی دوره‌های روزانه و فصلی نیز دارای تغییرات بوده است. بررسی‌هایی که توسط Darley و همکاران بر روی پایه‌های یک پل مشابه انجام پذیرفت نیز بیان کننده نتایجی مشابه بود. این موضوع بیانگر این است که بر اثر انقباض و انبساط دوره‌ای و متعاقبا حرکات دیوار، دانسیته و سختی خاکریز پشت دیوار افزایش یافته است.



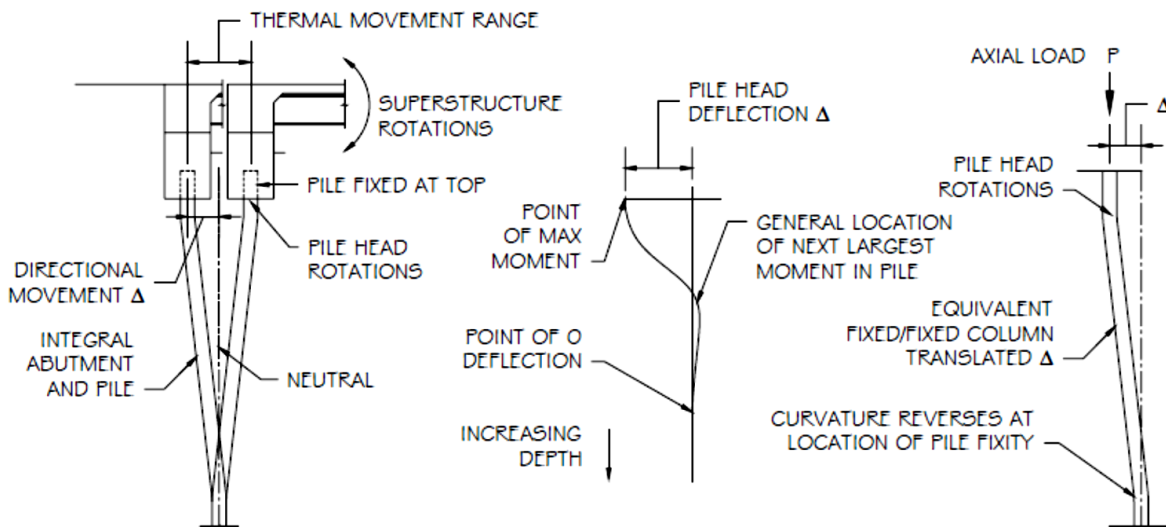
شکل (۲-۱۲): نمونه اجراء شده پل یکپارچه



برومز و اینگستون عملکرد فشار جانبی خاک بر روی پایه های دو پل دارای قاب سخت را ارزیابی نمودند. ارزیابی ها در طی تراکم خاکریزها پس از تکمیل پل ها صورت گرفتند. آنها به این نتیجه رسیدند که فشار خاک بلافاصله پس از بتنریزی و در هنگامی که پایه ها جابجایی جانبی نداشتند، دارای توزیع فشار ثابت و هیدروستاتیک بوده است. عبارتی فشار خاک در طی چرخه های انبساط و انقباض گرمایی افزایش یافته است. در تحقیقات دیگری که به منظور اندازه گیری فشار خاک پشت دیوارهای پایه های دو پل، انجام پذیرفت مشخص گردید که فشار پشت دیوار در قسمت های میانی ارتفاع دیوار بیشتر از قسمت های دیگر دیوار است. مطالعات دیگری که جهت بررسی نحوه توزیع فشار پشت پایه پلها صورت گرفت، نشان داد که در اثر دوران دیوار حول پایه، توزیع فشار خاک پشت دیوار غیرخطی بوده و بیشترین میزان فشار خاک در محدوده بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ ناحیه بالایی دیوار رخ می دهد.



شکل (۲-۱۳): عکس العمل کوله و شمع پل یکپارچه تحت اثر نیروی وارد بر عرشه



شکل (۲-۱۴): شمع پل یکپارچه و انحراف منحنی شمع، تحت اثر بارهای حرارتی و اثرات پی دلتا و بار محوری P و

مشخص شدن حداکثر لنگر و چرخش سر شمع در کوله

با توجه به مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

۱- با توجه به نحوه عملکرد دیوارهای انتهایی پلهای یکپارچه و همچنین با توجه به نتایج بدست آمده به نظر میرسد که نیروی وارد بر این دیوارها از نیرو در شرایط ساکن بیشتر و از نیرو در حالت مقاوم (بر اساس تئوری کولمب در شرایط مقاوم) کمتر می‌باشد.

۲- با افزایش تعداد سیکل حرکات دوره‌ای، میزان فشار وارد بر دیوار افزایش و نرخ افزایش فشار وارد بر دیوار کاهش یافته است و لذا پس از تعداد مشخصی سیکل حرکت دیوار، میزان فشار وارد بر دیوار ثابت خواهد شد.

۳- فرکانس‌های بارگذاری اعمالی (فرکانس‌های کم)، تاثیر قابل توجه‌ای بر میزان فشار وارد بین دیوار و خاک ماسه‌ای خشک ندارد.

۴- با افزایش دامنه تغییر مکان، ناحیه بیشتری از خاک پشت دیوار وارد ناحیه پلاستیک گردیده و لذا این امر سبب می‌گردد که ناحیه با فشار بیشینه به قسمت‌های پایین‌تر دیوار انتقال یابد.



۵- در دامنه تغییرمکان های کوچک میزان فشار وارد بر دیواره با فشار وارد بر دیواره در حالت سکون تفاوت چندانی ندارد.

۶- با افزایش دامنه تغییرمکان، تنش در نواحی انتهایی بدلیل پدیده قوس زدگی کاهش می یابد که این پدیده با افزایش تعداد سیکل حرکات دیواره نیز افزایش بیشتری یافته و لذا با افزایش دامنه تغییرمکان و با افزایش تعداد سیکل حرکات دیواره میزان تنش در نواحی انتهایی کاهش بیشتری خواهد یافت.

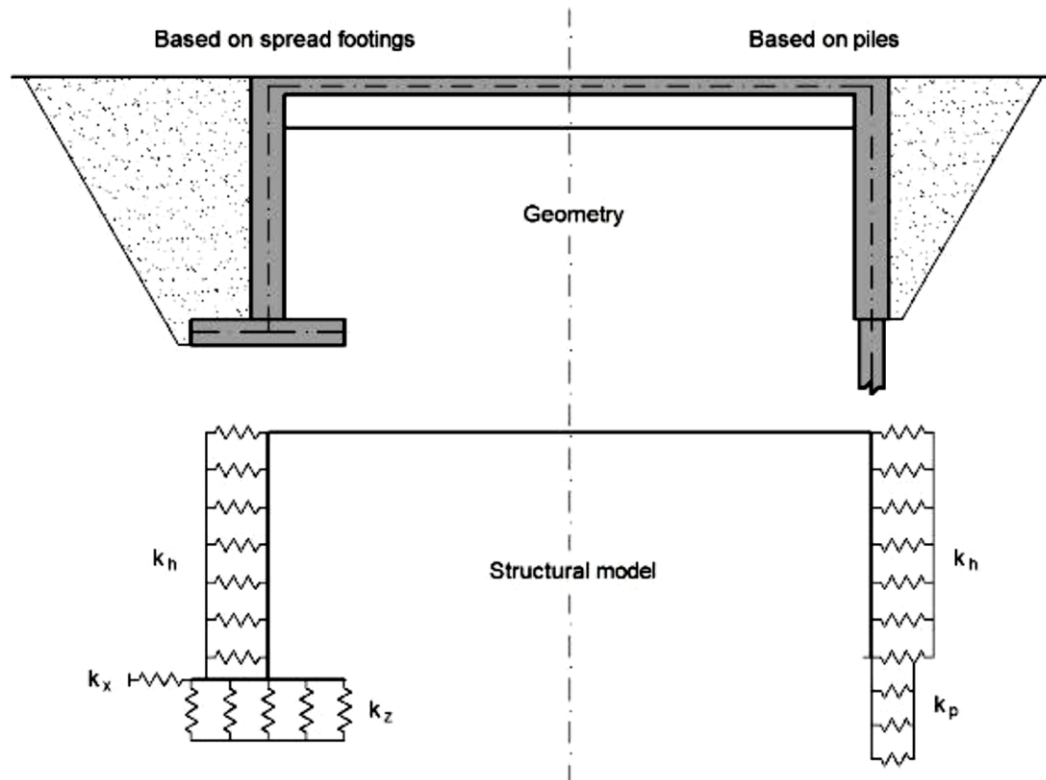
۸-۲- ارزیابی اثرات وابسته به زمان در پل های یکپارچه

تعداد زیادی از این نوع پل ها تا به امروز ساخته شده و عملکرد مناسبی از خود نشان داده اند. با زیاد شدن تجربه ساخت و طراحی این پل ها، طول کلی آنها نیز افزوده شده و تقاضای بیشتری برای بررسی رفتار و روش های طراحی آن خواهد شد. عرشه پیوسته و بدون درز انبساط که بصورت یکپارچه به کوله متصل شده است، یکی از عمده ترین نوع ساخت پل های با کوله یکپارچه است. دیافراگم انتهایی یا کوله بصورت یکپارچه با روسازه قالب بندی و سپس بتن ریزی می شود. خود کوله نیز ممکن است مستقیماً و بدون استفاده از سر شمع روی شمع قرار گیرد. اعضای تشکیل دهنده پل های یکپارچه عبارتند از: عرشه، کوله، پی زیر کوله که شامل تک ردیفی از شمع هاست، خاکریز پشت کوله، پایه ها و دیوارهای بالی (جناحی)، پیوستگی بین کوله و روسازه منجر به تنش های ثانویه می شود.

اثرات وابسته به زمان نظیر خزش و افت، تغییرات دما، فشار خاک اعمالی به کوله از طرف خاکریز پشتی آن و اندرکنش خاک - پل مهم ترین عواملی هستند که در طراحی باید مد نظر قرار گیرند. خاکریز پشتی آن و اندرکنش خاک - پل مهم ترین متغیرهایی هستند که در طراحی باید مد نظر قرار گیرند. وجود این متغیرها و ابهامات موجود در آنها باعث شده است که جزئیات طراحی بسیار محدودی در آئین نامه ها از جمله آئین نامه AASHTO، وجود داشته باشد. به همین دلیل ایالات مختلف در کشور آمریکا از جزئیات و روش های متفاوتی برای طراحی استفاده میکنند و طراحی و ساخت این پل ها بر پایه تجربیات گذشته استوار است. مشاهدات و



اندازه‌گیری‌های بدست آمده از این پل‌ها حاکی از عملکرد مناسب آنها در زمان سرویس‌دهی است، ولی این نکته نیز نباید فراموش شود که سطح تنش در قسمت زیرسازه در بسیاری از آنها نزدیک تنش‌های تسلیم است.



شکل (۲-۱۵): نمونه مدل‌سازی شده پل یکپارچه با فنر

۹-۲- نکات مهم در طراحی پل‌های یکپارچه با عرشه مرکب

این پل‌ها باید در برابر بارهای قائم و جانبی طراحی شوند. همچنین در هنگام طراحی باید مراحل ساخت تدریجی آنها مد نظر قرار گیرد و پل‌ها قادر به تحمل بارها در مراحل مختلف ساخت باشند. طبق توصیه ارائه شده در پژوهشی، این مراحل در پل‌های با عرشه مرکب بتن فولادی شامل ۳ مرحله است:

۱- بتن سخت نشده است و عملکرد مرکب وجود ندارد.

۲- عملکرد مرکب کاملاً وجود دارد، ولی برای در نظر گرفتن اثرات وابسته به زمان، مدول کشسانی بتن

۰/۳۳ حالت نهایی است.



۳- بتن کاملاً سخت شده و عملکرد مرکب کامل ایجاد شده است.

علاوه بر این، بیشینه طول پل‌های یکپارچه باید طبق مشخصات زیرسازه، روسازه و میزان تغییرات دمایی نسبت به دمای مرجع محدود شود. تغییرات فصلی دما منجر به انبساط و انقباض روسازه شده است و این امر سبب تغییر در مقدار فشار اعمالی خاکریز به کوله میشود. در حالت افزایش دما، کوله به خاکریز فشار داده شده است و این امر سبب ایجاد فشار مقاوم خاک در پشت کوله خواهد شد. میزان این فشار، تابعی از جابجایی کوله به طرف خاکریز است و باید از مدل نیرو-جابجایی برای تعیین آن استفاده شود. همچنین در حالت کاهش دما، کوله از خاکریز دور میشود و در این حالت نیز فشار محرک در پشت آن ایجاد خواهد شد. علاوه بر این، ساخت این پلها بصورت مورب سبب توزیع غیریکنواخت بارها و در نتیجه نیروی داخلی اضافی میشود. از اینرو توصیه شده است که این اثرات در پلهای مورب با زاویه‌ای بیشتر از ۲۵ درجه بررسی شود.

پایه‌های مورد استفاده در پل‌های یکپارچه دارای ضوابط طراحی یکسان با پایه‌های پل‌های متعارف هستند. تمایز اولیه بین پایه‌های مورد استفاده در پل‌های متعارف و یکپارچه عبارت از توانایی آنها برای سازگاری با جابجایی‌های بزرگ روسازه و تقسیم نیروهای طولی و جانبی بین قسمت‌های مختلف زیرسازه است.

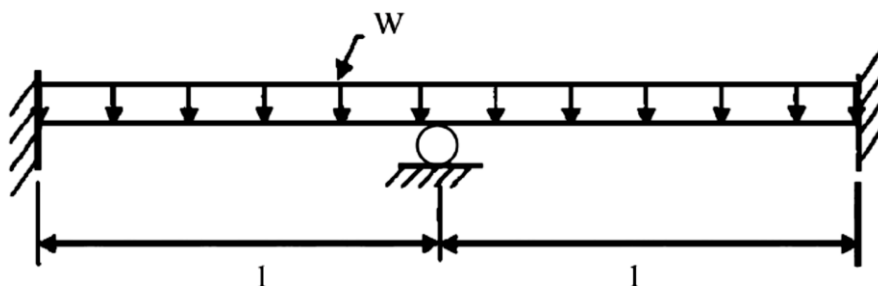
۲-۱۰- مدل سازه‌ای بکار رفته برای در نظر گرفتن رفتار وابسته به زمان عرشه

روسازه مرکب، شامل مصالح فولادی و بتنی است که رفتار و مشخصات آنها متفاوت از هم است. در تحلیل پل‌های یکپارچه با عرشه مرکب تحت بارهای سرویس‌دهی ثابت ضروری است که مشخصات مواد سازنده آن یعنی فولاد و بتن مورد بررسی قرار گیرد. ارزیابی اصولی و صحیح از نیروهای داخلی، تنش و کرنش ایجاد شده در مصالح عرشه، ترک در بتن و خیز عرشه از جمله معیارهایی هستند که برای کنترل کفایت مقطع بکار می‌روند.



در طول سرویس دهی پل، مشخصات مکانیکی فولاد ثابت است ولی این مشخصات در بتن با گذشت زمان دستخوش تغییر می شود. وجود پدیده هایی از قبیل افت و خزش در بتن باعث افزایش کرنش و در نتیجه ترک

در بتن خواهد شد. وجود این ترک ها در بتن سختی اعضای سازه ای را کاهش می دهد و منجر به افزایش خیز و باز توزیع تنش خواهد شد. پل های یکپارچه در محل اتصال کوله و روسازه، درز انبساط ندارند و از اینرو شاهتیرهای پل بصورت صلب به کوله ها متصل می شوند. زیرسازه پل معمولاً شامل کوله با ارتفاع کوتاه است که روی تک ردیفی از شمع ها واقع شده است. با وجود اتصال صلب روسازه - کوله، بسیاری از ادارات راه ایالت های مختلف آمریکا بدلیل سادگی در تحلیل، آنها را مانند پل های با تکیه گاه مفصلی مدل می کنند. با این وجود، بدلیل شکل فیزیکی و اثرات مهاری ایجاد شده در اثر خاکریز پشت کوله، بهتر است این اتصال گیردار در نظر گرفته شود.



شکل (۲-۱۶): مدل سازی روسازه

آیین نامه AASHTO و موسسه بتن آمریکا، معادلات متفاوتی برای محاسبه خزش و افت ارائه کرده اند، که طبق توصیه آیین نامه AASHTO هر دوی این معادلات می توانند برای ارزیابی اثرات خزش و افت بکار روند.



۲-۱۰-۱- نتیجه گیری از تحلیل اثرات وابسته به زمان در پل های یکپارچه با عرشه مرکب بتن فولادی

گذشت زمان باعث افزایش لنگر منفی در محل تکیه گاه ها و نیز کاهش لنگر خمشی مثبت در محل وسط دهانه شده است. علاوه بر این نتایج تحلیل نشان میدهد که استفاده از ضرایب آیین نامه AASHTO نسبت به آیین نامه ACI باعث تغییرات بزرگتری در مقدار لنگرها می شود، طوری که نسبت کاهش لنگر وسط دهانه و نیز افزایش آن در محل اتصال عرشه - کوله در پل با تکیه گاه گیرداری انتهایی در آیین نامه AASHTO نسبت به آیین نامه ACI برابر ۱/۲۸ است. این نسبت ها در پل با تکیه گاه مفصلی برابر ۱/۳۱ است.

بنابراین میتوان گفت که در هنگام محاسبه مقادیر لنگرهای خمشی وابسته به زمان عرشه، استفاده از ضرایب آیین نامه AASHTO نسبت به آیین نامه ACI باعث تغییرات ۳۰ درصدی در نتایج خواهد شد. مقایسه نتایج مربوط به خیز وسط دهانه برای پل با شرایط تکیه گاهی انتهایی متفاوت (گیرداری و مفصلی) نشان میدهد که با گذشت زمان مقادیر خیز وسط دهانه ها ۲ برابر شده اند که قابل توجه است.

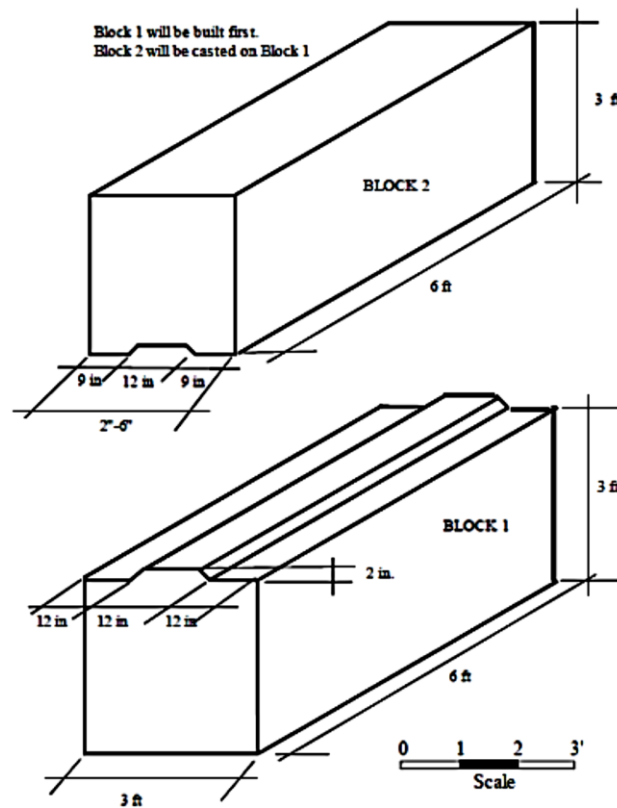
همچنین مقایسه نتایج حاصل از ضرایب آیین نامه های AASHTO و ACI حاکی از اختلاف جزئی بین آنها در محاسبه خیز است. نتایج تحلیل زیرسازه نیز نشان می دهد که استفاده از شمع قوی تر باعث ایجاد لنگرهای خمشی و نیروهای برشی بزرگتر و نیز تغییر شکل جانبی کوچکتر نسبت به شمع ضعیف میشود. همچنین کاهش در مقدار سختی شمع باعث کاهش در لنگر خمشی منفی سرشمع و افزایش لنگر خمشی مثبت میشود.

۲-۱۱- رفتار و مشخصات لرزه ای کوله های یکپارچه

از ویژگی های مهم یک سازه در تحلیل و طرح لرزه ای پیوند ارتعاش آزاد آن است. در مورد کوله های یکپارچه بدست آوردن پیوند ارتعاش فقط با یک مدلسازی دقیق از سازه و خاک پشت کوله و شمع ها و خاک دور شمع ها قابل بدست آوردن است. علت آن است که در واقع تمامی متغیرها در سختی سازه و جرم سازه که دو عامل عمده در تعیین پیوند می باشند اثرگذار هستند. متاسفانه رفتار خاک در مقابل کوله و شمع یک رفتار



غیر خطی است و جدا شدن کوله از خاک نیز ایجاد خلاء کرده که خود باعث تشدید رفتار غیر خطی خواهد شد.



شکل (۲-۱۷): نمای جانبی از تکیه‌گاه نیمه یکپارچه قبل از اصلاح توسط اداره حمل و نقل ویرجینیا

از دیگر متغیرهای مهم یک سازه در تحلیل لرزه‌ای مقدار ضریب میرایی سازه است. این ضریب برابر ۵ درصد میرایی بحرانی برای اکثر سازه‌ها، از جمله پل‌های معمولی در نظر گرفته می‌شود. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که برای کوله‌های یکپارچه بعثت درگیر شدن با خاک پشت کوله مقدار میرایی تا حد ۱۵ درصد هم می‌تواند بالا برود. این امر از لحاظ طراحی بسیار مناسب است و باعث کاهش بازتاب‌های ناشی از زلزله خواهد شد. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش ضریب میرایی بدلیل رفتار غیرخطی کوله-خاک-شمع است که بر اثر زلزله دچار نرمی می‌شوند. بطور تقریبی مطابق با یک تحقیق انجام شده مقدار ضریب میرایی را میتوان ۵ درصد فرض کرد تا زمانی که پریود سازه از ۱ ثانیه کمتر باشد. برای پریودهای بالای یک ثانیه مقدار ضریب میرایی را حداقل ۱۰ درصد میتوان فرض نمود.



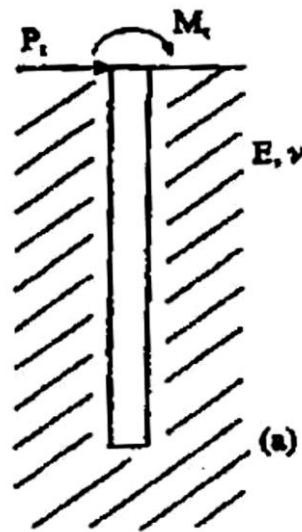
شایان ذکر است که تفاوت‌های عمده لرزه‌ای یک کوله یکپارچه با کوله معمولی در جهت طولی (محور جاده) پل است. در ایران در جهت طولی تمهیدات خاصی برای پل در نظر گرفته نمی‌شود. اکثر پل‌ها در جهت طولی پایداری مناسب لرزه‌ای ندارند و طراحان به برخورد احتمالی عرشه با دیوار پشتی کوله بعنوان یک عامل ایمنی - بدون هیچ محاسبه‌ای - حساب باز می‌کنند. کوله‌های یکپارچه از این نظر بسیار ایمن‌ترند و با محاسبات دقیق توانایی مهار مولفه طولی زلزله را دارند. در جهت عرضی، در کوله یکپارچه، عرشه مستقیماً درگیر با کوله است، و چون سختی کوله که بصورت دیوار برشی کار میکند بسیار زیاد است، در نتیجه پریود ارتعاش در این جهت پایین است. لیکن در پلهای معمولی در جهت عرضی سختی دیافراگم انتهایی پل، بالشت‌کها و نگهدارنده - های آنها، همگی در حد واسط عرشه و کوله واقع شده‌اند و باعث انعطاف‌پذیری بیشتر پل و بالا رفتن پریود در این جهت می‌شوند.

۲-۱۲- روش‌های مختلف مدل‌سازی شمع‌ها

پل‌های یکپارچه معمولاً با شمع در زیر کوله‌ها اجرا می‌شوند. انعطاف‌پذیری شمع‌ها در جهت طولی نقش بسزایی در کاهش تنش‌های حرارتی در کوله‌ها دارد. در این جهت آمادگی برای مدل‌سازی نرم‌افزاری این پل‌ها، به بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی شمع‌ها تحت بارهای جانبی و اندرکنش آنها با خاک پرداخته می‌شود.

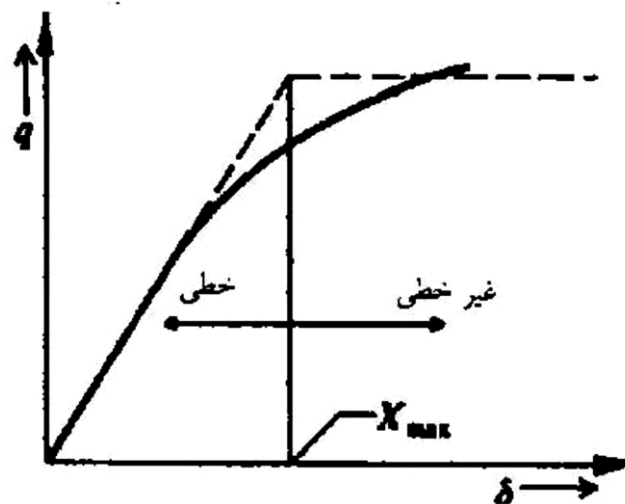
۲-۱۲-۱- مدل‌سازی ارتجاعی شمع و خاک

از ساده‌ترین مدل‌های قابل استفاده برای شمع‌هایی که تحت نیروهای افقی در قسمت سرشمع واقع می‌شوند، مدل ارتجاعی خاک و شمع است. مدل نشان داده شده در شکل (۲-۱۸) معرف یک شمع در خاک الاستیک است که بطور گسترده مورد استفاده بوده است.



شکل (۲-۱۸): مدل شمع و خاک الاستیک

در این مدل همانطور که در شکل (۲-۱۹) نمایش داده شده است خاک با یک سری فنرهای خطی معادل در طول شمع جایگزین میگردد. سختی این فنر برابر ضریب عکسالعمل ارتجاعی خاک در نظر گرفته می شود.

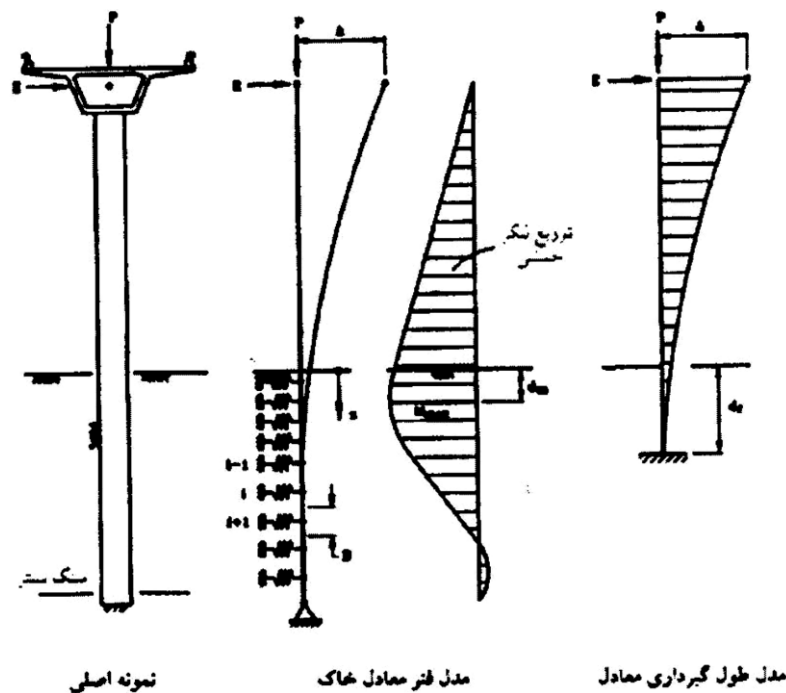


شکل (۲-۱۹): نمودار نیرو-جابجایی خاک



۲-۱۲-۲- روش طول موثر گیرداری

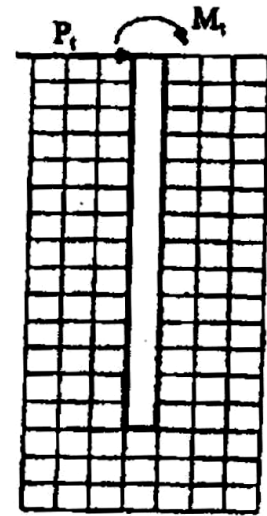
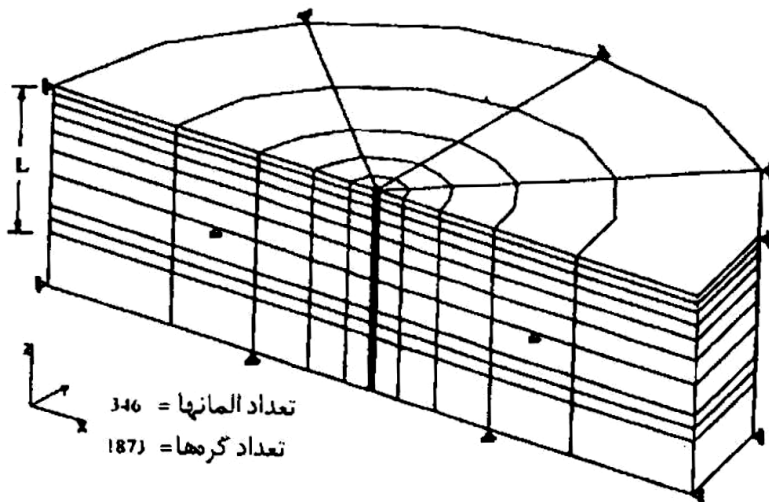
در این روش یک طول موثر برای شمع تعریف میشود. به این صورت که عضو شمع بدون فنرهای خاک مدل میشود و در یک عمق مشخص که به عمق موثر معروف است انتهای آن گیردار میشود. شکل (۲-۲۰).



شکل (۲-۲۰): روش طول موثر گیرداری

۲-۱۲-۳- شمع الاستیک و مدل اجزای محدود

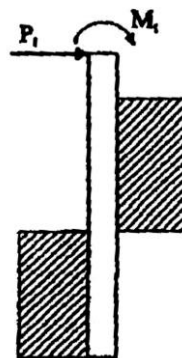
در این روش خاک به روش اجزای محدود مدلسازی میشود. مدل اجزای محدود خاک میتواند دو بعدی و یا سه بعدی باشد و اعضای خاک ممکن است خطی یا غیرخطی در نظر گرفته شوند، اعضای شمع نیز میتواند دوبعدی یا سه بعدی باشند. شکل (۲-۲۱) نمونه‌ای از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی اجزای محدود خاک را نشان می‌دهد. این روش در صورت بکار گرفته شدن بصورت سه بعدی غیرخطی و تخمین درست رفتار غیرخطی خاک میتواند بهترین روش برای مدلسازی اندرکنش خاک و شمع باشد اما هزینه محاسباتی زیادی دارد و علاوه بر آن وقتگیر است.



شکل (۲۱-۲): شمع الاستیک و مدل اجزای محدود دوبعدی و سه بعدی خاک

۲-۱۲-۴- شمع صلب و خاک لاستیک

برومز مدل نشان داده شده در شکل (۲۲-۲) را استفاده کرد تا باربری حداکثر جانبی شمع را بدست آورد. در این مدل شمع طلب فرض میشود و بوسیله معادلات استاتیک توزیع مقاومت حداکثر خاک روی شمع برای ایجاد تعادل مشخص می شود. شکل (۲۲-۲) توزیع فشار خاک در حالت خاک چسبنده را طبق فرضیات برومز نشان میدهد. بعد از بدست آوردن مقاومت نهایی به این روش برومز پیشنهاد میکند برای بدست آوردن تغییر مکان هر نقطه از شمع از روش اول استفاده شود. این روش بطور مشخص از فرضیات ساده کننده زیادی استفاده میکند. با توجه به فرضیات برومز این روش برای شمعه های کوتاه و برای دید اولیه به طراح مفید است.



شکل (۲۲-۲): مدل شمع صلب و خاک پلاستیک



۲-۱۳- مدل سازی خاک پشت کوله

از دیگر موارد مهم مدل سازی پل های یکپارچه، مدلسازی خاک پشت کوله و کوله ها است. در رفت و برگشت های زلزله و یا تغییرات حرارتی عرشه، کوله در حال فشار آوردن به خاک و یا بالعکس خاک در حال فشار آوردن به کوله است. در این حین تنش خاک، از حالت فعال به سکون و بعد به حالت مقاوم و بازگشت به حالت اول، دائم در تغییر است. این رفتار غیرخطی اگر به درستی مدلسازی نشود نیروهای بدست آمده در کلیه اجزای پل را با خطای فاحش روبرو میکند. با توجه به اینکه کوله پل به نوعی دیوار حایل محسوب میشود، روشهای محاسبه دیوار حایل برای کوله نیز قابل استفاده هستند. برای مدلسازی کوله انواع روشهای خطی و غیرخطی وجود دارد که در این بخش روشهای غیرخطی که دقیقتر هستند مد نظر قرار میگیرند. با توجه به اینکه خاک پشت کوله پلها از نوع شن متراکم هستند به ارایه روشهای مختلف مدلسازی غیرخطی کوله و دیوار حایل در تماس شنی پرداخته می شود.

۲-۱۴- پیشینه تحقیق

قدرتی امیری اثر سه نوع مختلف کوله و انواع مفاصل پلاستیک و نحوه مدل سازی سایر اجزا مربوط به شش مدل از پل های بتنی موجود با ارتفاع و طول متفاوت را بررسی کرده است. برای بررسی این اثرات از نتایج تحلیل های مودال و استاتیکی غیرخطی و روش طیف ظرفیت ATC-40 استفاده شده است. نتایج تحلیل ها به صورت مودهای ارتعاشی، پیشینه برش پایه و نقطه عملکرد در دو جهت طولی و عرضی و راستای ۴۵ نسبت به جهت طولی پل ها ارائه شده اند. نتایج به دست آمده نشان داده که اختلاف زیادی بین مقادیر زمان های تناوب ارتعاشی، پیشینه برش پایه و نقاط عملکردی در پلهایی با طول کلی حداکثر ۸۰ متر به دست آمده، بنابراین در تحلیل رفتار لرزه ای این پل ها چشم پوشی از رفتار غیرخطی اجزای کوله ها موجب ایجاد خطاهای عمده در نتایج تحلیل شده است. در پل های بلند با طول کلی حداقل ۱۲۰ متر پاسخ ها با مدل های مختلف اجزای پل ها تقریباً مشابه بوده است.



منصوری آسیب پذیری لرزه ای پل های بتن آرمه از جمله از نظر شرایط ساختگاه، فروریزی عرشه، علل ضعف های لرزه ای ستون ها و اتصالات تیر پایه های قابی شکل، نامنظمی پل ها و پل های مورب را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به پیشنهاد های راهنمای بهسازی لرزه ای پل ها مبنی بر استفاده از تجهیزات مستهلک کننده انرژی در سازه ها به منظور بهبود رفتار لرزه ای آنها، در این تحقیق بعد از بررسی آسیب پذیری لرزه ای پل های بتن آرمه به ارزیابی مقایسه ای حالات بهره گیری از دستگاه های تکیه گاهی هسته سربی در حداثا فصل بین عرشه با سرستون و کوله ها (مدل جداسازی شده) نسبت به اتصال صلب (مدل یکپارچه) پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد عمل جداسازی سبب کاهش سختی سازه و افزایش پیود آن تا حدود ۱۰ برابر می شود. با بررسی مودهای تغییر شکل سازه مشخص شده که تقریباً تمام انرژی زلزله در مودهای اول و دوم سازه جداسازی شده است که مودهای غالب جهت های افقی هستند که در آن سازه تغییر شکل ندارد و تنها عرشه بر روی تجهیزات مذکور می لغزد، اما در مدل یکپارچه مودهای سوم و دهم مودهای غالب جهت افقی هستند که تغییر شکل های شدید عرشه توأم با تغییر شکل های ستون ها را در پی دارد. استفاده از این تجهیزات از اعوجاج های پیچیده پل تا حد زیادی نسبت به مدل یکپارچه جلوگیری می کند و سبب می شود عرشه تحت اثر زلزله بر روی تجهیزات مذکور بلغزد و با این رفتار موجب جذب و استهلاک بالای انرژی و همچنین بهبودی مودهای تغییر شکل شود و همچنین از خرابی های لرزه ای پل در محل اتصال عرشه به تکیه گاه های جلوگیری کند.

لک اثر طول دهانه بر توزیع فشار خاک پشت کوله ها با دید انتخاب طول دهانه بر اساس طول موج شتاب ورودی اعمال شده را توسط نرم افزار تفاضل محدود flac2D مورد بررسی قرار داده است. در این پژوهش طول موج شتاب ورودی با نماد λ نشان داده شده است. طول دهانه های انتخابی متناسب و عددی مابین آنها انتخاب شده است. همچنین به منظور ارائه نتایج واقعی تر و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک در شرایط دینامیکی، میرایی Hysteretic برای خاک مورد استفاده قرار گرفته است. با افزایش طول دهانه فشار خاک وارد شده به کوله کاهش یافته و توزیع فشار خاک یک نمودار غیرخطی است.



عیسی زاده فر اهمیت و ضرورت ترکیب بارهای حرارتی و لرزه‌های پل‌های یکپارچه را مورد بررسی قرار داده است که این پل‌ها در معرض بارهای اولیه و اثرات ثانویه قرار دارند که بارهای حرارتی و لرزه‌های یکنواخت نقش عمده‌ای در پاسخ پل‌های یکپارچه بازی می‌کنند و باتوجه به اینکه تکیه‌گاه‌های پل‌های یکپارچه معمولاً از یک ردیف شمع فولادی H شکل برای ایجاد انعطاف‌پذیر مناسب می‌شوند، بنابراین این شمع‌ها تا حد زیادی تحت تأثیر هر دو بار لرزه‌ای و حرارتی در طول هستند. علاوه بر این، باتوجه به برخی از آیین‌نامه‌های طراحی مانند AASHTO و Eurocode ترکیب بارهای حرارتی و لرزه‌ای برای طراحی پل لازم نیست، ولی با دانستن اینکه، آیین‌نامه مشخص کرده است ترکیبات بار در درجه اول برای پل‌های با اتصالات انبساطی است و ضرورت بررسی افزودن بارهای حرارتی به ترکیب بار لرزه‌ای در جهت طولی برای پل‌های بدون درز انبساط، آشکار به نظر می‌رسد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نادیده گرفتن ترکیب بار حرارتی و لرزه‌ای در برخی از موارد می‌تواند برای پل‌های یکپارچه بسیار خطرناک باشد و تغییر دمای منفی که باعث ایجاد انقباض در پل‌های یکپارچه می‌شوند بسیار بحرانی هستند. متغیرهایی مانند شدت و فرکانس محتوای زلزله، طول دهانه و تنوع درجه حرارت مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده که تغییر دما مهم‌ترین عامل مؤثر بر طراحی پل‌های یکپارچه است.

بتینگر (Bettinger) برای بررسی اثر تغییرات حرارت روی رفتار پل نیمه یکپارچه مورب مطالعه میدانی و تحلیل نرم‌افزاری انجام داده است. ایشان در مطالعه میدانی از یک پل نیمه یکپارچه مورب ۴ دهانه برای اندازه‌گیری نیروی تولید شده در دیوارهای بالی (WingWall)، حرکت پل و نیروی شمع‌ها استفاده کرده است و برای بررسی اثر زاویه به (اریب) و سختی خاکریز در مقدار نیروی دیوار بالی و حرکت پل، از یک مدل تحلیلی اجزاء محدود با مشخصات پل میدانی با زوایای اریب و سختی خاکریز متفاوت در نرم‌افزار SAP2000 استفاده کرده است. زوایای اریب ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه و سختی خاکریز ۱۶۶-۱۰ پوند بر اینچ مکعب در نظر گرفته شده است. بتینگر از بررسی میدانی چنین نتیجه گرفت که مقدار حرکات پل، تابع سختی خاکریز پشت کوله‌ها و دیوارهای بالی است. تغییرات مقدار نیروی دیوارهای بالی تابع تغییرات مقدار حرکت پل است و یک رابطه



غیرخطی بین این دو وجود دارد. با افزایش مقدار نیروی دیوار بالی مقدار حرکت پل کاهش می‌یابد. وی از مدل‌سازی اجزاء محدود در زوایای اریب متفاوت و سختی خاکریز متفاوت مشاهده کرد که در سختی خاکریز کم، با کاهش زاویه اریب مقدار نیروی دیوار بالی کاهش می‌یابد. اما با افزایش سختی خاکریز عکس‌العمل دیوارهای بالی در زوایای اریب بالا خیلی سریع‌تر از زوایای اریب پایین کاهش می‌یابد. بنابراین در طراحی دیوارهای بالی، داشتن زاویه اریب بالا بهتر از سختی خاکریز بالا است.

دونکن (Duncan) با انجام یک سری تحلیل‌های اجزای محدود، اندرکنش‌های پیچیده موجود بین اعضای متفاوت پل یکپارچه را تحت بارگذاری حرارتی بررسی کرده است. اندرکنش‌های مورد بررسی عبارت‌اند از: اندرکنش خاک پشت کوله، خاک اطراف شمع، خاکریز پشت کوله خاک اطراف شمع. علاوه بر اینها، اثر سختی خاک پشت کوله و اطراف شمع و نوع کوله (یکپارچه و نیمه یکپارچه) روی رفتار کلی پل در این تحقیق، بررسی شده است. برای این کار، یک پل طویل ۹۱/۴ متر با عرشه مرکب تیر فولادی و دال بتنی که روی کوله‌های ضخیم به ضخامت ۰/۹ متر و ارتفاع ۳ متر نگه داشته شده، در نرم‌افزار SAGE به‌صورت دوبعدی مدل شده است. کوله روی یک ردیف شمع قرار دارد. نتایج این تحقیق، نشان داده است که: اندرکنش‌ها بین اعضاء اثر مفیدی روی تنش‌های شمع نگهدارنده کوله دارد و در صورتی که خاک اطراف شمع نرم باشد، تنش برشی و لنگر خمشی در یک مقدار معلوم تغییر شکل بالای شمع، کاهش می‌یابد. هر چه سختی خمشی شمع زیاد باشد، تنش کوله‌ها افزایش می‌یابد.

دیجللی (Dicleli) و همکارانش توصیه‌هایی در مورد حداکثر طول پله‌ای یکپارچه ساخته شده در خاک ماسه‌ای ارائه کرده‌اند. در این تحقیق، حداکثر طول پل از روی توانائی شمع‌های فولادی H شکل نگهدارنده کوله در برابر جابه‌جایی چرخه‌ای و ظرفیت خمشی کوله تحت اثر بارهای حرارتی تعیین می‌شود. برای بررسی اثر تغییرات در هندسه پل، متغیرهای سازهای و ژئوتکنیکی روی عملکرد پله‌ای یکپارچه تحت اثر بار حرارت



یکنواخت، تحلیل‌های پوش‌آور استاتیکی روی مدل‌های مورد بررسی انجام شده است. از روی نتایج این تحلیل‌ها، حداکثر طول برای پله‌ای یکپارچه بتنی ۱۹۰ متر در آب‌وهوای سرد و ۲۴۰ متر در آب‌وهوای معتدل محدود می‌شود و برای پل‌های فولادی این محدوده در آب‌وهوای سرد ۱۰۰ متر و در آب‌وهوای معتدل ۱۶۰ متر است. دیکللی (Dicleli) و همکارانش معادلات تحلیلی برای تخمین حداکثر ظرفیت جابه‌جایی شمع‌های فولادی H شکل در پله‌ای یکپارچه با کوله‌های کوتاه تحت اثر بار حرارتی را ارائه کرده‌اند. در این تحقیق، در ابتدا مقاومت کمانش محلی شمع‌های فولادی H شکل بررسی شده تا شمع بدون کمانش قادر به تحمل تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک باشد. روابط لنگر انحنا شمع‌ها برای بارهای محوری متفاوت تعیین شده و سپس یک مدل خستگی سیکل کم برای تعیین حداکثر انحنای چرخه‌ای که شمع قادر به تحمل آن باشد، به‌کاررفته است. روابط لنگر انحنا و حدود انحنای چرخه‌ای به‌دست‌آمده در تحلیل پوش‌آور استاتیکی دو شمع فرورفته در خاک، برای تعیین ظرفیت جابه‌جایی جانبی حرارتی شمع استفاده شده است. سپس با استفاده از نتایج تحلیل پوش‌آور، ظرفیت جابه‌جایی شمع فولادی H شکل به‌صورت تابعی از خصوصیات شمع، نوع و سختی خاک فرمول‌بندی شده است و در نهایت، از روی ظرفیت جابه‌جایی جانبی شمع، حد حداکثر طول پل یکپارچه تحت اثر بار حرارتی تعیین شده است. حداکثر طول پل یکپارچه بتنی بین ۱۵۰ تا ۲۶۵ متر در مناطق سردسیر ۱۸۰ تا ۳۲۰ متر در مناطق معتدل و برای پله‌ای فولادی ۸۰ تا ۱۴۵ متر در مناطق سردسیر و ۱۲۵ تا ۲۲۰ متر در مناطق معتدل تخمین زده شده است.

اوستر (oster) و همکارانش رفتار پله‌ای یکپارچه مورب را تحت انبساط حرارتی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. برای این کار، ۱۹ پل یکپارچه در ایالات تنسی مورد آزمایش و بررسی میدانی قرار گرفته و حرکات عرضی و طولی کوله شمالی پل تحت انبساط حرارتی ثبت شده است. در این تحقیق، برای بررسی اثرات زاویه اریب روی پاسخ پل یکپارچه تحت انبساط حرارتی مطالعه تحلیلی نیز انجام‌گرفته است. در پل مورب، فشار غیرفعال خاک در پاسخ به افزایش طول حرارتی یک مؤلفه عرضی دارد. بنابراین پله‌ای مورب در دو جهت طولی و عرضی در برابر تغییرات حرارت پاسخ خواهند داشت. از نتایج تحلیل‌های به‌دست‌آمده از



تحقیق، رابطه‌ای بین زاویه اریب و نیروهای عرضی کوله‌های یکپارچه استنباط شده است که از روی آن می‌توان مقدار نیروی لازم برای مقاومت در برابر دوران عرشه حول محور عمود بر عرشه در ارتباط با زاویه اریب و یا مقدار حرکت را تعیین کرد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داده است که با افزایش زاویه اریب و کاهش نسبت طول به عرض پل حرکت عرضی افزایش می‌یابد. علاوه‌بر آن اگر زاویه اریب پل برابر با زاویه اصطکاک خاک و کوله باشد، اصطکاک بین خاک و کوله در برابر پیچش عرشه مقاومت کرده و نیاز به بررسی اثر زاویه اریب در رفتار پل احساس نمی‌شود ولی در صورتی که این زاویه بزرگ‌تر باشد بایستی اثر آن بررسی شده و مقدار نیروی مقاوم لازم برای مقابله در برابر پیچش عرشه تعیین شود. این نیروی مقاوم توسط زیرسازه پل یکپارچه تأمین خواهد شد و باید در تحلیل و طراحی زیرسازه در نظر گرفته شود.

جین (Jin) و همکارانش یک نوع جدید و ساده‌ای از کوله نیمه یکپارچه ارائه کرده‌اند که خرابی خاک پشت کوله را به مقدار قابل‌توجهی کاهش داده است. در این کوله‌ها، اساساً روسازه قادر است به طور مجزا از زیرسازه حرکت کند. در کوله‌های نیمه یکپارچه قبلی در طی حرکت چرخه‌ای روسازه خاک پشت کوله زیر دال دسترسی شل شده و سطح خاک پایین آمده و باعث گسیختگی دال دسترسی شده است. برای رفع این مشکل نوع جدیدی از کوله نیمه یکپارچه در این تحقیق ارائه شده است که در این کوله، یک دیوار پیشانی بتن مسلح در برابر خاکریز پشت کوله در نظر گرفته شده است. این دیوار مجزا از تیرهای عرشه است و یک فاصله ۲۵ میلی‌متری بین دیوار پیشانی و تیرها وجود دارد. این فاصله امکان حرکت آزاد را برای عرشه فراهم می‌کند. برای تسهیل حرکت روسازه، بین دال دسترسی متصل به عرشه و دیوار پیشانی و بین دال دسترسی و خاک زیرین، ورقه‌ای پلاستیکی قرار داده شده است. نشیمنگاه تیرها روی کوله نیز نشیمنگاه الاستومری لغزشی است. بدین ترتیب تحت بارگذاری حرارتی، روسازه می‌تواند به راحتی حرکت کند. از آن جایی که دیوار پیشانی مجزا از روسازه خاک پشت کوله را نگه داشته است، خاک پشت کوله از این حرکت تأثیری نمی‌گیرد و به این ترتیب مشکل خرابی خاک پشت کوله، شل‌شدگی آن و پایین آمدن سطح خاک مرتفع می‌شود.



کیم (Kim) و همکارانش مدل‌هایی برای پیشگویی پاسخ پل یکپارچه تحت بار حرارتی، گرادیان حرارتی، فشار خاک پشت کوله، اثرات وابسته به زمان شامل افت، جمع‌شدگی و آزادشدگی تیرهای پیش‌تنیده ارائه کرده‌اند. مدل تحلیلی دوبعدی شامل اندرکنش‌های غیرخطی خاکریز پشت کوله - کوله، خاک اطراف شمع، شمع و اتصال دیوار پیشانی به کوله است. عمر پل مطابق آشتو ۷۵ سال در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق به‌قرار زیر است: مقدار ضریب انبساط حرارتی تأثیر خیلی زیادی روی نیروی محوری تیرها، لنگر خمشی تیرها، نیروی جانبی شمع، لنگر شمع و جابه‌جایی سر شمع دارد. طول پل اثر زیادی روی نیروی محوری تیر، نیروی جانبی شمع، لنگر شمع، جابه‌جایی سر شمع دارد. ارتفاع خاک پشت کوله و سختی آن اثر نسبتاً زیادی روی پاسخ پل دارد.

مینگ (Ming) و همکارانش رفتار لرزه‌ای یک پل یکپارچه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه بررسی کرده‌اند. برای این کار یک پل سه دهانه به طول کلی ۶۸/۵ متر تحت زلزله کوبه ۱۹۹۵ با مدل دوبعدی اجزای محدود مدل‌سازی شده است. در این مدل خاک اطراف سازه توسط فنرهای غیرخطی با رفتار مطابق مدل الاستیک-پلاستیک هیپربولیک Ramberg-Osgood مدل شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق، نشان داده که مدل الاستیک-پلاستیک برای مدل‌سازی خاک اطراف پل یکپارچه منطقی بوده و اندرکنش خاک سازه در تحلیل لرزه‌ای پل یکپارچه باید در نظر گرفته شود. همچنین با ارزیابی سلامت پل بر اساس تئوری طراحی برحسب عملکرد نتیجه گرفته شده است که روش طراحی برحسب عملکرد برای پله‌ای یکپارچه مطلوب و منطقی است.

بوردته و همکارانش آزمایشی را در رابطه با به‌دست‌آوردن تنش‌های ماکزیمم اتکایی بتن که ناشی از اجزای‌های مدفون شده فلزی است را انجام دادند. در این آزمایش ۶ اجزای بزرگ فلزی در داخل دال بتنی فونداسیون قرار داده شده و به همراه آنها بتن‌ریزی گردیده است. این نمونه‌ها با خروج از مرکزیت بسیار کم تحت بار جانبی قرار گرفتند. این نمونه‌ها تا لبه دال بتنی فاصله زیادی داشته و عملاً بتن در اطراف این نمونه‌ای دفن شده، محصور شده کامل فرض شد. مطالعات تحلیلی نیز برای بررسی صلبیت اجزای داخل شده در داخل



فونداسیون الاستیک انجام پذیرفت. این تحلیل ها که توسط نتایج آزمایش نیز مورد تأیید هستند نشان داد که اجزای فولادی مدفون به صورت جسم صلب در داخل فونداسیون حرکت و دوران داشته است. با این دانسته و فرض اینکه بلوک تنش مستطیلی آیین نامه ACI در مقابل اجزای فولادی مدفون قرار دارد، تنش ماکزیمم اتکایی محاسبه گردید و با مقامت فشاری بتن مقایسه گردید.



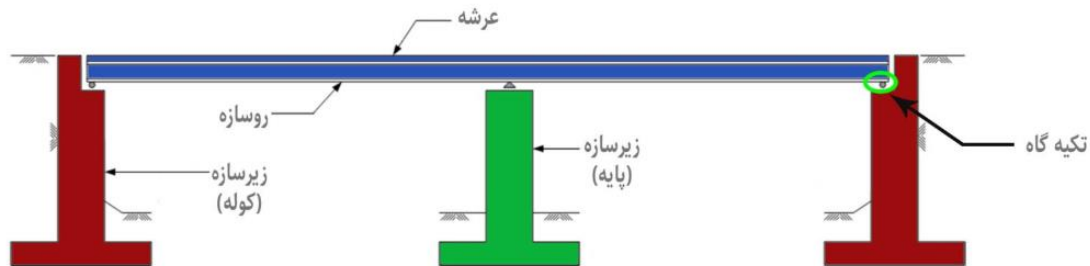
فصل ۳

نحوه اجرای کوله های پل



۳-۲- تعریف کوله پل

کوله ها یکی از المان های زیر سازه بوده که وظیفه اصلی آنها انتقال بار از عرشه به پی می باشد و علاوه بر وظیفه فوق نگهداری خاک ریز پشت کوله را نیز بعهده دارند.



شکل (۳-۱)، کوله پل

۳-۳- انواع کوله ها

کوله ها به چند دسته عمده تقسیم بندی می شوند:

- کوله بسته
- کوله باز
- کوله خاک مسلح

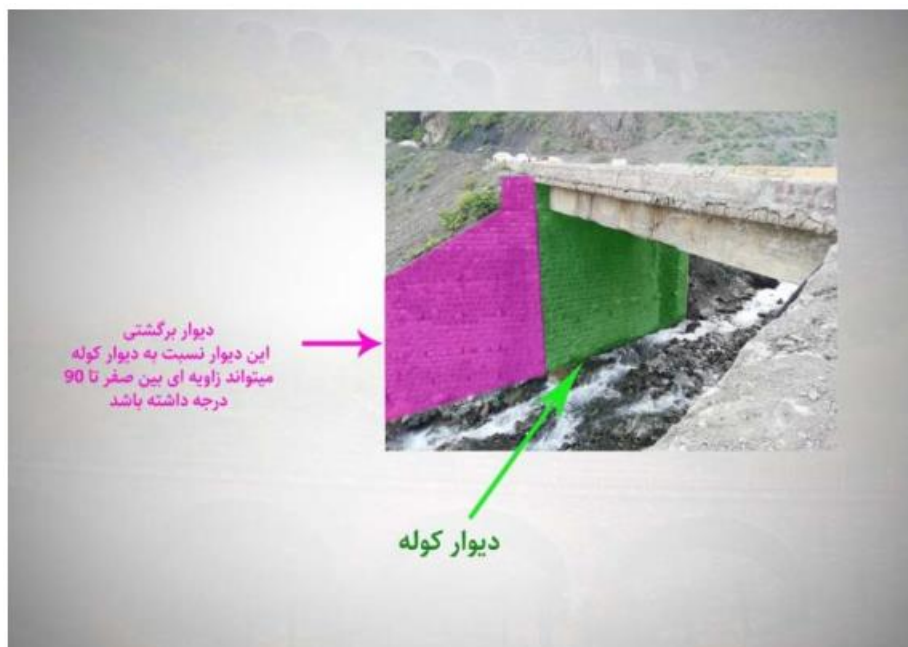
۳-۳-۱- معرفی کوله بسته

کوله بسته کنسولی به صورت یک دیوار سراسری کنسولی می باشد که دهانه پل را از خاک پشت پل جدا می کند علاوه بر اینکه بارهای وارده از عرشه را به پی منتقل می کند فشار خاک پشت کوله را هم می بایست تحمل کند.



شکل (۳-۲)، کوله بسته بتن مسلح

کوله بسته را می توان به صورت بتن مسلح، بتن وزنی و یا مصالح بنایی احداث کرد.



شکل (۳-۳)، کوله مصالح بنایی محور شمشک دیزین



کوله‌های بسته کنسولی بتن مسلح معمولاً تا ارتفاع ۱۲ متر مناسب بوده بیشتر از این میزان ضخامت دیوار افزایش یافته و از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد لذا در صورت نیاز به ارتفاع زیاد از پشتبند در این نوع از کوله‌ها استفاده می‌گردد که باعث می‌شود کوله بسته از حالت کنسولی خارج شود، پشتبندهای فوق به پی گیردار شده و مشابه یک کش عمل می‌کنند که اجازه حرکت کوله به سمت جلو را می‌گیرد.



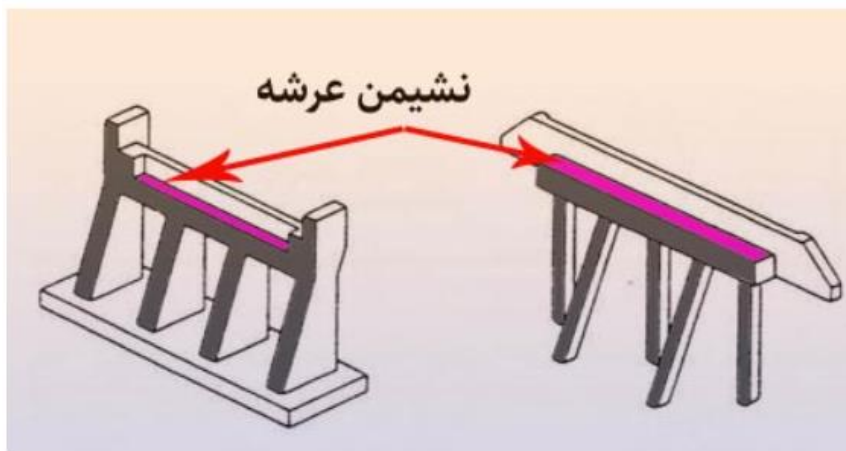
شکل (۳-۴)، کوله بسته با پشتبند

در این حالت معمولاً ضخامت دیوار حداکثر به حدود ۸۰ سانتیمتر خواهد رسید به طور معمول ضخامت دیوارهای کوله‌های بسته در حدود ۵۰ الی ۶۰ سانتیمتر بوده و پشتبندها به طور معمول در فواصل چهار متری قرار خواهند گرفت تنها مشکل عمده‌ای که در دیوارهای پشتبند ایجاد می‌گردد کوبیدن خاک پشت توسط غلطک می‌باشد با توجه به اینکه خاک پشت کوله نیاز به تراکم بالایی می‌باشد برای جلوگیری از نشست در آینده (در حدود بالای ۹۵ درصد) لذا استفاده از پشتبندها محدودیت‌هایی در هنگام عملیات تراکم ایجاد می‌کنند.



۳-۲-۳- معرفی کوله باز

مشابه یک پایه میانی می باشد در این نوع از کوله ها هیچگونه حائلی بین دهانه پل و خاکیز وجود نداشته و خاک می تواند از بین ستون ها حرکت کرده و بوسیله شیب طبیعی خود پایدار شود این نوع از کوله ها مشابه پایه های میانی از ستون و سرستون تشکیل شده و همچنین می تواند به صورت دیوارهای تیغ ای نیز در نظر گرفته شود.



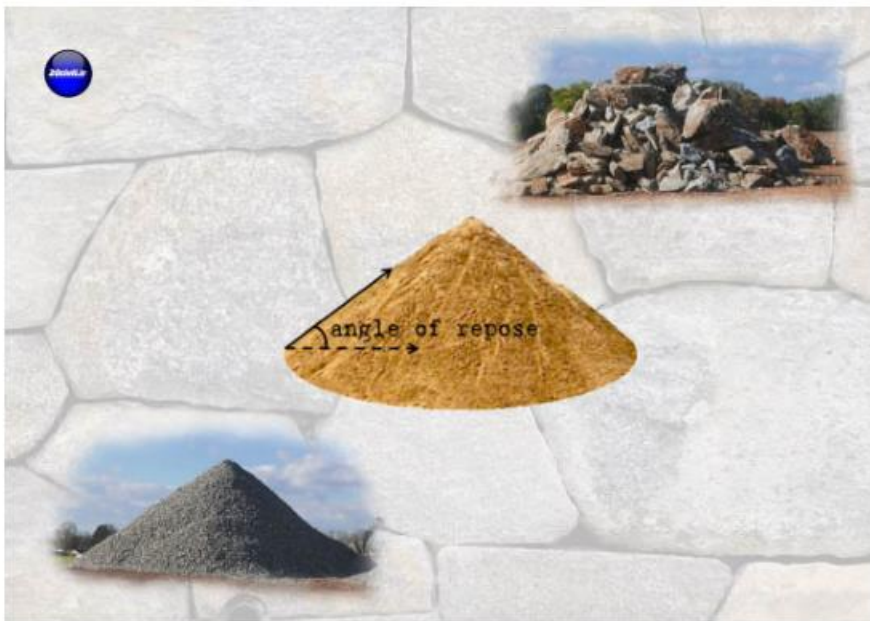
شکل (۳-۵)، شماتیک کوله های باز



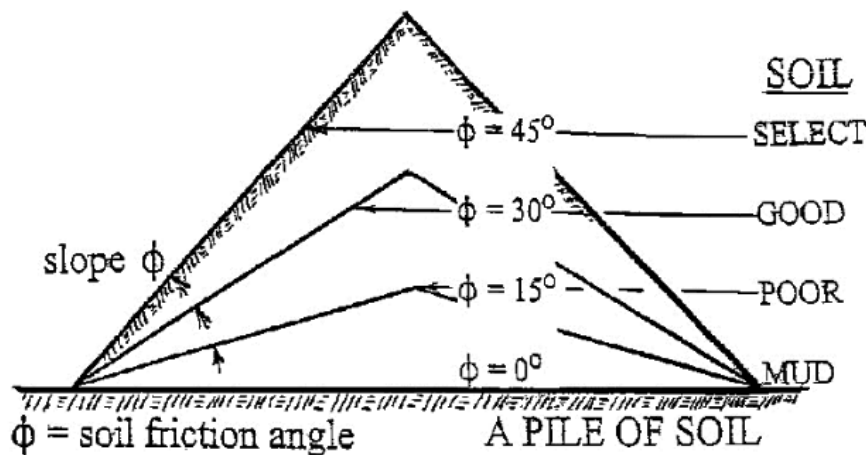
شکل (۳-۶)، چند نمونه از کوله های باز



خاکریز رها شده در کوله‌های باز طولی از دهانه پل را اشغال می‌کنند که میزان طول اشغال شده توسط خاکریز بستگی به شیب پایداری این مصالح ریخته شده در پشت کوله دارد همانطور که اشاره شد به شیب فوق شیب پایداری یا Angle of Repose گفته می‌شود. این شیب پایداری بستگی به نوع خاکی که در پشت کوله مورد استفاده قرار می‌گیرد دارد که هرچه قدر مصالح پشت کوله‌ها درشت دانه‌تر باشد این شیب به حالت قائم نزدیکتر خواهد بود.



شکل (۷-۳)، شیب پایداری یا Angle of Repose



شکل (۸-۳)، شیب پایداری براساس زوایای اصطکاک خاک‌های مختلف



با توجه به اینکه نوع و تراکم مصالح خاکریز پشت کوله براساس ضوابط آیین‌نامه‌ای تعیین می‌گردد بنابراین می‌بایست از مصالح ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده در پشت کوله‌ها استفاده گردد که معمولاً شیب ماسه خوب دانه‌بندی شده برای خاک‌های ماسه‌ای حدود نسبت ۲ به ۱ و در حالت ایده‌آل تر ۳ به ۲ می‌باشد.

به طور مثال معمولاً ارتفاع خاکریز در مناطق شهری در حدود ۶ الی ۷ متر می‌باشد بنابراین در صورت استفاده از کوله باز و خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی در حالت ایده‌آل شده فضایی در حدود ۱۰ الی ۱۱ متر از دهانه مجاور کوله اشغال خواهد شد بنابراین در یک پل تقاطع غیرهمسطح در صورت استفاده از کوله باز فضای محدودی در زیر پل خواهیم داشت.



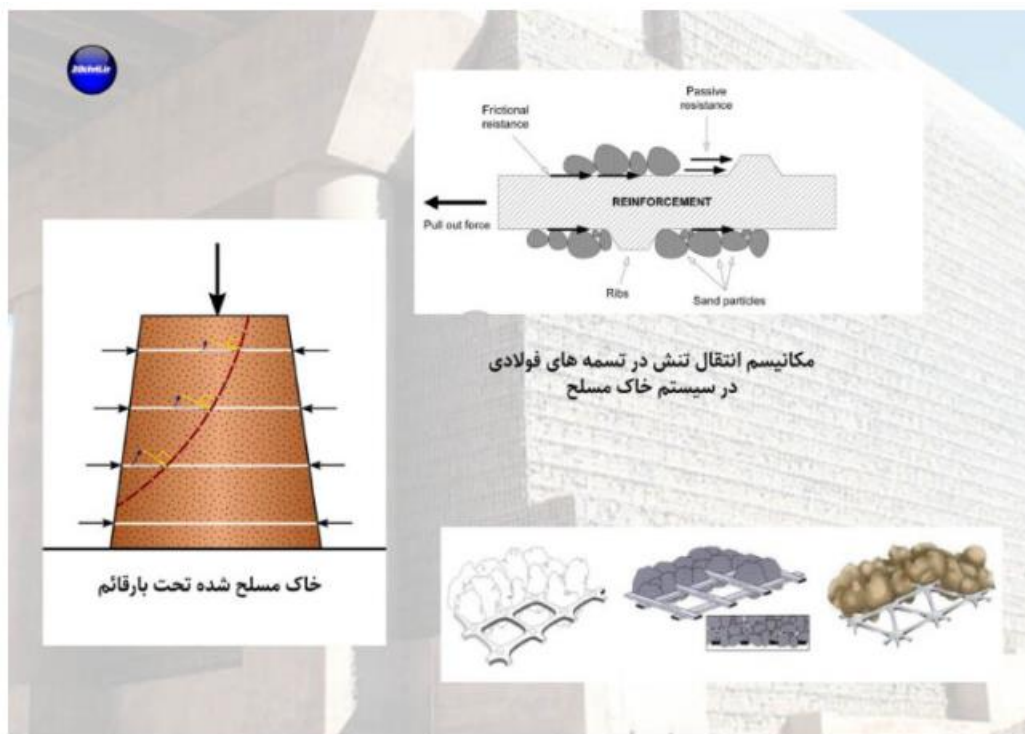
شکل (۳-۹)، نمونه‌هایی از تقاطع غیر همسطح

کوله‌های باز در مناطقی که نیاز به استفاده از فضای زیر دهانه پل نباشد گزینه مناسب‌تری می‌باشد بیشتر کاربرد این نوع از کوله‌ها در پل‌ها دره‌ای می‌باشد و گاهی اوقات در مناطق شهری نیز از این نوع از کوله‌ها به جهت زیباسازی فضای شهری استفاده می‌گردد.



۳-۳-۳- معرفی کوله های خاک مسلح

کوله های خاک مسلح که به صورت دیوارهای حائل یا کوله در ساخت پل ها مورد استفاده قرار می گیرد این نوع از دیوارها به صورت ثقلی (Gravity) عمل کرده و بوسیله عملکرد اصطکاکی که میان مسلح کننده هایی که بین لایه های خاک قرار می گیرد و عملکرد فشار محصور شدگی Confinement Pressure باعث ایجاد مقاومت برشی در خاک شده و از تنش های برشی که باعث گسیختگی خاک می شود جلوگیری می کند.



شکل (۳-۱۰)، مکانیسم عملکرد سیستم خاک مسلح

این سیستم نسبت به کوله های بسته محدودیت ارتفاع نداشته و بیشترین ارتفاعی که از این نوع سیستم به عنوان دیوار حائل استفاده شده است حدود ۴۲ متر می باشد و همچنین نسبت به کوله های بتن مسلح کنسولی که عملکرد صلبی دارند این سیستم از انعطاف پذیری بالاتری برخوردار بوده و نسبت به نشست و با توجه به تجربیات زلزله های گذشته از عملکرد بهتری برخوردار می باشد.



شکل (۱۱-۳)، کوله خاک مسلح در پل سگمنتی به روش طره متعادل



شکل (۱۲-۳)، دیوار خاک مسلح فرودگاه SeaTac در ایالت واشینگتن به ارتفاع حدود ۴۲ متر



این نوع از دیوارها از سه مولفه اصلی برخوردار هستند:

(۱) خاک

خاکی که در این سیستم مورد استفاده قرار گیرد می بایست عملکرد زهکشی خوبی داشته باشد و استفاده از خاک های رسی و سیلتی بدلیل پدیده خزش و زهکشی نامناسب توصیه نمی گردد به همین دلیل خاک های ماسه ای و به طور کلی خاک های دانه ای به جهت زهکشی و اصطکاک خوبی که بین مسلح کننده ها ایجاد می کنند دارای عملکرد بهتری می باشد مشخصات خاکریز مورد استفاده جهت سیستم های خاک مسلح براساس ضوابط آیین نامه ای به شرح جدول زیر می باشد:

Gradation: (AASHTO T-27)	U.S. Sieve Size	Percent Passing^(a)
	4 in. (102 mm) ^(a,b)	100
	No. 40 (0.425 mm)	0-60
	No. 200 (0.075 mm)	0-15
Plasticity Index, PI (AASHTO T-90)	$PI \leq 6$	
Soundness: (AASHTO T-104)	The materials shall be substantially free of shale or other soft, poor durability particles. The material shall have a magnesium sulfate soundness loss of less than 30 percent after four cycles (or a sodium sulfate value less than 15 percent after five cycles).	

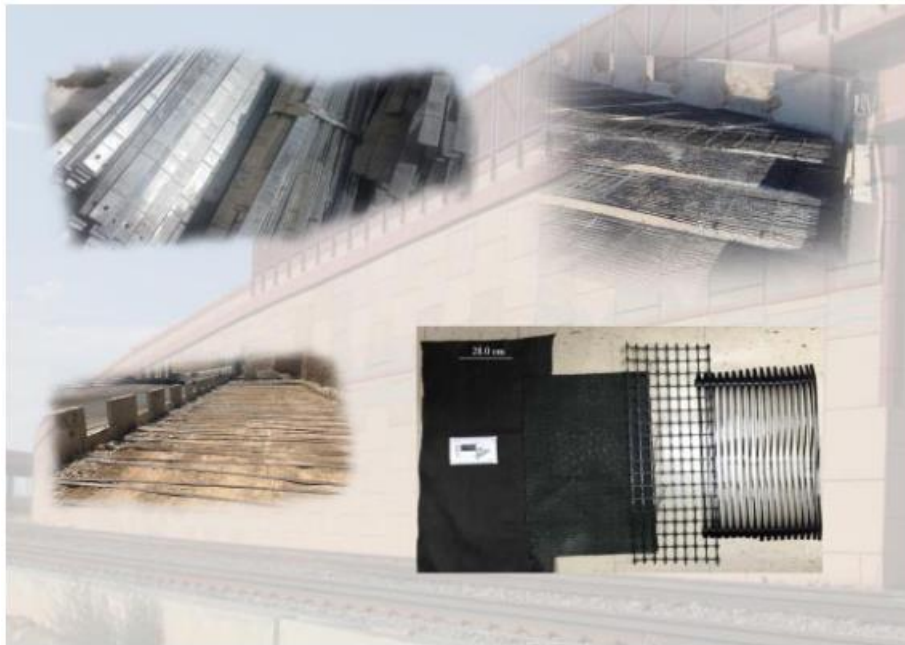
شکل (۳-۱۳): مشخصات مصالح خاکریز براساس ضوابط آیین نامه ای

(۲) المان مسلح کننده

المان های مسلح کننده به دو نوع پلیمری و فلزی تقسیم بندی می شوند دیوار اجرا شده با مسلح کننده های فلزی دارای شکل پذیری کمتری بوده و مسئله خوردگی می بایست در آنها در نظر گرفته شود که امروزه از پوشش های گالوانیزه در سطح این نوع مسلح کننده ها استفاده می گردد مسلح کننده های پلیمری



شکل پذیری بالاتری داشته پدیده خزش و استفاده از آنها در مناطق گرمسیری می بایست در هنگام طراحی این نوع سیستم ها در نظر گرفته شود.



شکل (۳-۱۴)، انواع المان های مسلح کننده در سیستم خاک مسلح

۳) المان نما

المان های نما بیشتر باعث دید بصری مناسب و محافظی در برابر عواملی از قبیل هوازدگی و فرسایش می باشد متداول ترین المان های نمایی که برای کوله ها خاک مسلح امروزه مورد استفاده قرار می گیرد پانل های بتنی پیش ساخته می باشد که در اشکال و طرح های مختلف اجرا می گردند در پشت پانل های بتنی قلاب هایی جهت اتصال مسلح کننده به پانل تامین می گردد که بسته به شرایط طراحی تعداد آنها متفاوت می باشد.



شکل (۳-۱۵)، انواع پانل های پیش ساخته بتنی



شکل (۳-۱۶)، نحوه اتصال مسلح کننده های پلیمری و تسمه فلزی به پانل های بتنی پیش ساخته

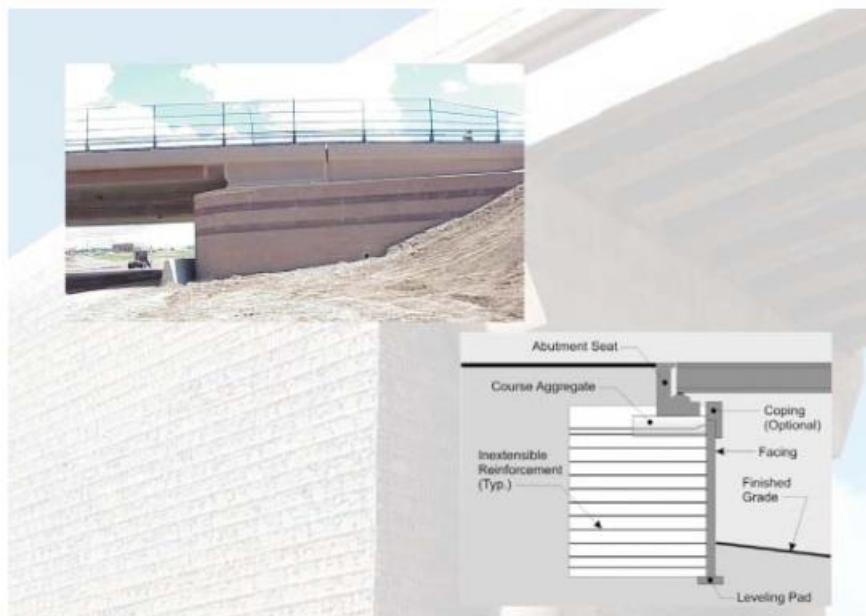
کوله ها خاک مسلح به دو حالت در پل ها اجرا می گردد:

حالت اول: در این حالت بار خاک پشت کوله به خاک مسلح انتقال پیدا می کند و با احداث یک نشیمن

که مستقیماً بر روی خاک مسلح قرار گرفته است بارهای وارد به عرشه را به نشیمن و در نهایت به خاک مسلح

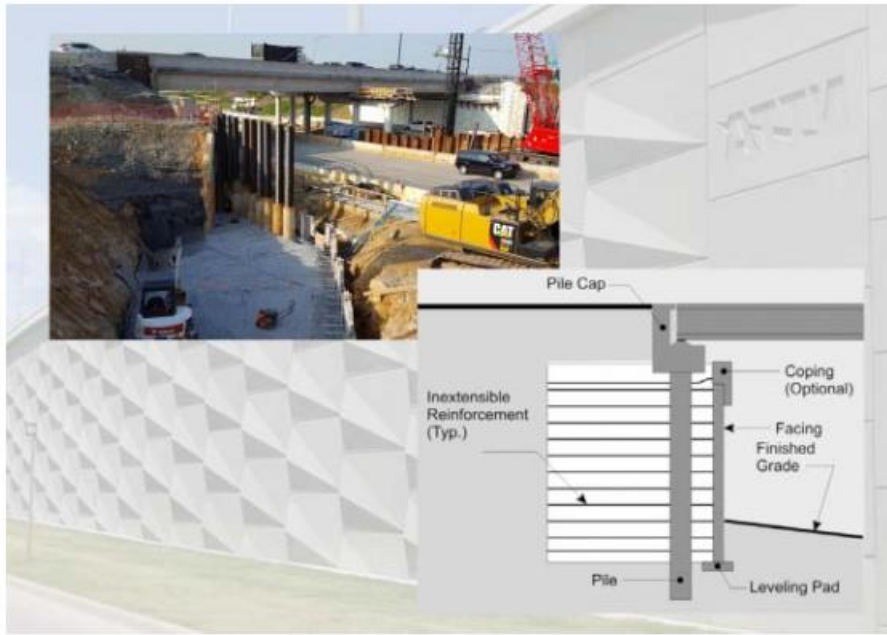


انتقال می دهیم این شرایط برای دهانه کوتاه مناسب بوده و بدلیل اینکه برای دهانه های بلند بارهای زیادی به تکیه گاه ها و در نهایت به نشیمن وارد می گردد این حالت برای دهانه های بلند مجاز نبوده و امکان نشست در خاکریز پشت کوله به دلیل عبور بار زنده وجود خواهد داشت که در نهایت منجر به آسیب دیدگی درزهای انبساط می گردد آیین نامه آشتو نیز میزان بار وارد از تکیه گاه عرشه به خاک مسلح را محدود به ۴ ksf یا ۲۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته است و براساس همین آیین نامه حداقل فاصله مرکز تکیه گاه نشیمن گاه تا لبه بیرونی پانل نما می بایست ۳.۵ فوت در نظر گرفته شود.



شکل (۳-۱۷)، احداث نشیمن عرشه بر روی خاک مسلح

حالت دوم: در این حالت از دورن خاک مسلح شمع هایی عبور داده می شود به این صورت که شمع ها یا پایه ها احداث شده بار وارد از عرشه را مستقیماً به زمین انتقال دهند سپس خاک مسلح اجرا می گردد این حالت محدودیتی نسبت به روش قبلی را ندارد. در صورتی که شمع از داخل خاک مسلح عبور داده شده باشد می بایست اثر فشار خاک دیده شود.



شکل (۳-۱۸)، احداث کوله‌های خاک مسلح براساس حالت دوم

امروزه در سطح کل ایران نیز احداث پایه ها در جلو خاک مسلح به وفور با انواع مسلح کننده های تسمه فولادی و پلیمری به وفور استفاده میگردد.



ALIREZA ELMAKCHI
civil engineering group

نحوه اجرای کوله های پل و نحوه اجرای آن – مهندس علیرضا المکچی



ALIREZA ELMAKCHI
civil engineering group

نحوه اجرای کوله های پل و نحوه اجرای آن

تهیه کننده: مهندس علیرضا المکچی

کانال آموزش های مهندسی عمران

[@civil_engineering_learnings_AE](https://www.instagram.com/civil_engineering_learnings_AE)