



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد اسلام آباد غرب
Islamic Azad University
اصول مهندسی پل



دکتر نورالدین زارعی

گروه عمران

فهرست

عناوین :

- ۳ تاریخچه مهندسی پل -
- ۷ طبقه بندی پل ها -
- ۱۳ مهندسی رودخانه و آب شستگی -
- ۲۴ تکیه گاه های پل -
- ۲۷ خطوط تاثیر -
- ۳۳ بارهای وارد بر پل -
- ۵۶ نمونه محاسبات نیروی برشی و لنگر خمشی حداکثر -

تاریخچه مهندسی پل

بشر همواره بدنبال راهی برای حمل و نقل کالا از محلی به محل دیگر بوده است . حمل و نقل از طریق رودخانه توسط قایقهای اولیه ، اولین روشی بود که بشر بدان دست یافت . رودخانه و دریا در هر امتداد و مسیر دلخواه وجود نداشت و بشر ناگزیر به فکر ساخت و استفاده از راه های زمینی شد . اولین راه های ساخته شده شاید راه های ارتباطی بین چند روستا باشد . لزوم سرعت بیشتر در ارتباطات و همچنین سنگین تر شدن محمولات و استفاده از وسایل حمل و نقل پیشرفته تر بشر را به این فکر انداخت که برای عبور از دره ها و رودخانه معبری ایجاد نماید که امروزه به آن پل (Bridge) می گوئیم .

هرچه سرمایه گذاری اولیه در ساخت پل بیشتر باشد هزینه های استهلاک وسایل نقلیه و زمان ، در آینده کمتر خواهد بود . علاوه بر مسائل اقتصادی-سیاسی-اجتماعی، پل ها نقش استراتژیک و تعیین کننده ای در مسائل نظامی دارند . از این لحاظ است که در تاریخ جنگ ها یکی از اهداف مهم تخریب پل ها و سازه های مربوط به آن بود . از لحاظ تاریخی ، اولین پل ها ، تیرهای ساده از جنس سنگ یا چوب بودند که در دهانه های بزرگ توسط الیاف ها به صورت معلق مهار می شدند .

در میان اقوام اروپایی ، رومیان پیشتاز استفاده از طاق سنگی بعنوان سازه پل در اسمیرنای ترکیه به تاریخ ۹۰۰ سال قبل از میلاد مسیح نسبت داده می شود . در میان اقوام شرقی ، ایرانیان ، هندیان و چینیان پیشتازان و صاحبان فن و هنر معماری می باشند . در تاریخ معماری ایران احداث پل های قابل توجهی ثبت شده است . لیکا در شرایط حاضر همه آنها پابرجا نیست . این مسئله را باید بیشتر از آنجا ناشی دانست که پل ها در معرض خطر شدیدترین فرسایش ها و تخریب های ناشی از جریان های طغیانی هستند . در سرزمین امروزی ایران ، قدیمی ترین پلی که اثر آن به جا مانده ، پلی است که بر روی رودخانه ارس در مرز بین ایران و شوروی سابق بنا گردید . ساخت بناهای ترکیبی پل و سد در دوره ساسانی و بویژه در مناطق باتلاقی و سیلابی ادامه یافت و برای حفاظت بیشتر پایه پل ها ، ایجاد شالوده های پهن در زیر آنها متداول شد . پل دختر که در شمال غربی اندیمشک قرار دارد ، در زمان پادشاه اول ساسانی ساخته شده که در اوایل دوره اسلامی طاق هایی از سنگ بر روی پایه های آن ساخته شد که قسمتهایی از آن باقی است .



تصویر ۱- پل دختر (دوره ساسانی)

درادوار اسلامی بسیاری از پل های دوره های ساسانی و دیگر ادوار گذشته تعمیر گشت و افزون بر آن پل های دیگری نیز در نقاط مختلف ایران به سبک اسلامی و با مصالح آجری ساخته شد . پل های عمده این دوران عبارتند از :

- پل ضیاء الملک بر روی رودخانه کرخه منسوب به قرن هشتم هجری .

- پل رودخانه قزل اوزن در جنوب میانه که از نوع طاقی (قوسی) و منسوب به اواخر قرن نهم هجری .

دوران صفوی را می توان دوران شکوفایی معماری ایران در دانست که فن پل سازی نیز بی تاثیر از آن نیست . از پل های ممتاز این دوره ، پل الله وردی خان (سی و سه پل) و پل خواجه به طول ۱۳۲ متر با ۲۱ دهانه، که هردو بر روی زاینده رود در شهر اصفهان می باشند .



تصویر ۲- پل خواجه (زمان شاه عباس دوم)

با شروع قرن نوزدهم میلادی شناختی تازه از مقاومت کششی چدن بدست آمد . ساخت طاق ها و خرپاهای چدنی و یا ترکیبی از چوب و چدن رواج پیدا کرد . اولین پل چدنی در انگلستان به شکل یک قوس نیم دایره و به دهانه ۴۲ متر توسط توماس پیچارد ساخته و نصب گردید . افتخار ساخت اولین سازه خرپایی پل نصیب آمریکاییان گردید . پل فرمانت که توسط لوییس (طراح پل می سی سی پی در سال ۱۸۷۴) به دهانه ۱۰۲ متر از جنس چدن که در اوایل قرن نوزدهم ساخته شد و با آتش سوزی مهیبی در سال ۱۸۳۸ از بین رفت . تمامی این پل ها بصورت تجربی و بر پایه تئوری های معماری بنا می گردید تا اینکه رانکین در سال ۱۸۵۸ کتابی تحت عنوان مکانیک کاربردی منتشر نمود و در حدود ۵۰ سال بعنوان کتاب مقدس طراحان پل مورد استفاده قرار گرفت . در این دوره، در کنار پل های خرپایی پلهای معلق نیز مورد استفاده قرار گرفتند . پل معلق آبشار نیاگارا با دهانه ای بطول ۲۵۰ متر از شاهکارهای آن دوره (بین سالهای ۱۸۵۱ تا ۱۸۵۵) می باشد . از دیگر سازه های مشهور در آن زمان می توان به پل بروکلین در سال ۱۸۸۳ که توسط شخصی به نام واشنگتن فارغ التحصیل رشته مهندسی ساختمان با صرف هزینه ۹ میلیون دلار ساخته شد و تا مدتها بعنوان رکورددار دهانه باقی ماند .

با شروع قرن بیستم و پیدایش و رونق اتومبیل و کامیون ، ساخت پل های جاده در کنار پل های راه آهن آغاز شد . پیشرفت علم مقاومت مصالح و تحلیل سازه ها و انتشار آیین نامه های محاسباتی ، پل های جدیدتری ساخته شد و رکوردهای دهانه ها یکی پس از دیگری شکسته شد . در کنار فولاد که با مقاومت های گوناگون تولید می شد، بتن مسلح نیز شناخته و تئوری های آن بسط داده شد . در این دوران در کنار مقاومت پل ، مسئله زیبایی آن نیز رفته رفته مطرح شد . از سال ۱۹۲۸ انجمن آمریکایی ساختمان های فولادی (ASIC) هرساله جایزه ای برای طرح زیباترین پل اختصاص داد . طراحان علاقه ای به استفاده از دهانه های نامعین نداشتند واکثر آنها از دهانه های ساده یا پلهای طره ای استفاده می کردند . در سال ۱۹۳۷ پل عظیم و معلق گلدن گیت در کالیفرنیا افتتاح شد . همه چیز این پل در زمان خود ، عظیم و رکورددار بود . دهانه ۱۲۸۰ متری، ارتفاع ۲۲۷ متری و قطر کابل های ۱۰۳ سانتیمتری، همگی از خصوصیات این شاهکار بی نظیر بود .



تصویر ۳- پل گلدن گیت کالیفرنیا (ساخت سال ۱۹۳۷ میلادی)

ارتعاشات و سپس خرابی پل تاکومای واشنگتن در مقابل طوفانی نه چندان قوی، زنگ خطری برای پل ها محسوب شد . کم بودن مقاومت پیچشی عرشه پل، علت اصلی تخریب آن بود . از آن به بعد طراحان بر روی مسائل آیرودینامیکی پل و ارتعاشات آن در مقابل نیروهای جانبی نظیر باد، زلزله، فشار آب و خاک و از همه مهم تر ارتعاش دینامیکی حاصل از حرکت و برخورد ماشین آلات بر پایه های پل، آزمایشات گسترده ای را انجام دادند و بعد از جنگ جهانی دوم استفاده از تکنیک پیش تنیدگی را چاشنی تجربیات حاصل از آزمایش و مطالعات خود قرار داده و موفقیت چشم گیری در مهار نیروهای مخرب قبلی پدید آمد . رکورد دهانه در پل های معلق اروپا متعلق به پل هامبر در انگلستان با دهانه مرکزی ۱۴۱۰ متر می باشد که به تازگی در دانمارک با ساخت پل معلق با دهانه ۱۶۲۴ متر و پل آکاشی ژاپن با دهانه ۱۹۹۱ متری شکسته شد . در حال حاضر عقیده براین است که با توجه به پیشرفت های حاصله، تحول و تکامل و ابداع در امر پل سازی به آخر خط رسیده است اما همچنان باید این نکته را در نظر داشت که طراحان امروزی پل، ابزار جدیدی به نام کامپیوتر را در اختیار دارند که ظرف چند دقیقه، محاسباتی را انجام می دهند که در گذشته نه چندان دور برای انجام آن ماه ها وقت لازم بود . در نتیجه در کنار توسعه در بهبود خواص مصالح و نتایج دقیق تحلیل های کامپیوتری، می توان صرفه جویی های زیادی را در امر مصرف مصالح بوجود آورد و در مقام مقایسه بهینه ترین آنها را انتخاب نمود .

در اینجا به شرح مختصری از تاریخچه پلسازی در گیلان زمین نیز می پردازیم :

تاریخچه ساخت اولین پلها در گیلان به دوران صفویه و ساخت پلهای طاقی خشتی - ساروجی بر می گردد که از مهم ترین آنها میتوان به پل خشتی لنگرود در شرق گیلان اشاره نمود که در سال ۹۲۶ هجری قمری و بطول ۳۷ متر و عرض ۴/۵ متر و ارتفاع ۱۰ متر ساخته شد و توسط حاجی آقا منجم باشی در زمان فتحعلی شاه قاجار مرمت شد . از آن دسته پل ها به نمونه های متعدد دیگری نیز همچون پل خشتی لاهیجان بطول ۵۰ متر منتسب به دوره قاجاریه ، پل خشتی لوشان بطول ۱۰۰ متر و عرض ۷ متر که پس از زلزله سال ۱۳۶۹ مورد بازسازی و مرمت قرار گرفت ، اشاره نمود .



تصویر ۴- پل خشتی لنگرود (دوران صفویه)

پل آجری پونل بطول ۳۰ متر با دهانه های بزرگ طاقی شکل و پل متحرک غازیان انزلی بطول ۴۰ متر که در سال ۱۳۱۸ شمسی ساخته شد، از دیگر آثار تاریخی مطرح خطه گیلان زمین می باشند که حفظ و نگه داری آنها بعنوان شناسنامه فرهنگ پل در منطقه لازم و حیاتی به نظر می رسد .



تصویر ۵- پل خشتی لوشان (دوران قاجاریه)

طبقه بندی پل ها

در یک تقسیم بندی کلی، شالوده و پایه های پل را زیرسازه و آن قسمت که به صورت سیستم خمشی وظیفه تحمل عبورگاه (عرشه) را بین پایه ها به عهده دارد، روسازه نامیده می شود. پل را از جهات مختلف می توان طبقه بندی نمود.

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر طول دهانه

۱ - دهانه های کوتاه (زیر ۸ متر)

۲ - دهانه های متوسط (بین ۸ تا ۶۰ متر)

۳ - دهانه های بلند (بزرگتر از ۶۰ متر)

برای هر یک از طبقه بندی های فوق سیستم های مناسبی در نظر گرفته می شود.

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر سیستم سازه ای

۱ - پل های صفحه ای (دال و تیر)

۲ - پل های خرپایی

۳ - پل های قوسی (طاقی)

۴ - پل های معلق

۵ - پل های قابی

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر مصالح

۱ - پل ها با مصالح بنایی و بتن غیر مسلح

۲ - پل های بتن مسلح (درجا و پیش ساخته)

۳ - پل های بتن پیش تنیده (پیش کشیده و پس کشیده)

۴ - پل های فولادی

۵ - پل های مرکب (فولاد و بتن)

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر شیوه ساخت

۱ - اجرای درجا با قالب بندی

۲ - اجرای پیش ساخته (نصب با جرثقیل - نصب به روش هل دادن)

۳ - اجرای طره ای

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر کاربری

۱ - پل های عابرپیاده

۲ - پل های جاده (راه شوسه - راه آهن)

۳ - پل های روگذر و زیرگذر شاهراه ها

۴ - پل های عبور خطوط تاسیسات (آب، نفت، گاز و ...)



تصویر ۶- پل طاقی (قوسی) تنکابن



تصویر ۷- جزئیات پل بتنی پیش تنیده (پس کشیده)



تصویر ۸- پل بتنی دال و تیر (گلسار رشت)



تصویر ۹- پل معلق (گلدن گیت)



تصویر ۱۰- پل خرپایی

- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر سیستم سازه ای

۱ - پل های یک عنصری : شامل یک دال بتنی مسلح یکطرفه است که در دو انتها بر روی تکیه گاه متکی است .

۲ - پل های دو عنصری :

متشکل از تیرهای حامل متعدد می باشد که یک دال بتنی مسلح یا فولادی بر روی آن قرار دارد . دال بعنوان عنصر شماره ۱ بار را به تیرهای اصلی و تیرها بعنوان عنصر شماره ۲ بار را به تکیه گاه منتقل می نمایند .

۳ - پل های سه عنصری :

متشکل از دو تیر اصلی ، تیرهای عرضی (عمود بر تیرهای اصلی) و دال بتن مسلح می باشد . دال بار را به تیرهای عرضی، تیرهای عرضی به تیرهای حامل طولی (اصلی) و تیرهای حامل بار را به تکیه گاه ها منتقل می نمایند .

۴ - پل های چهار عنصری :

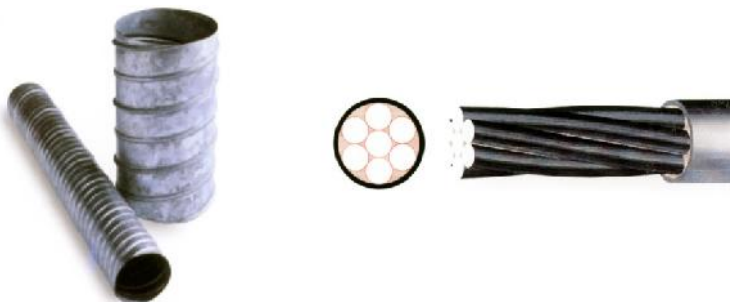
متشکل از دو تیر اصلی ، تیرهای عرضی (عمود بر تیرهای اصلی) ، تیرچه های طولی و دال بتن مسلح می باشد . دال بار را به تیرچه های طولی ، تیرچه ها به تیرهای عرضی، تیرهای عرضی به تیرهای حامل طولی (اصلی) و تیرهای حامل بار را به تکیه گاه ها منتقل می نمایند .

- آشنایی با بتن پیش تنیده

از دیدگاه کلی پیش تنیدگی به معنای ایجاد تنش های دایمی مخالف با تنش های موجود است . بطور مثال ایجاد تنش های فشاری در مقطع تیر بمنظور خنثی سازی تنش های کششی موجود . به دلایل مختلف، بتن مورد استفاده در سازه های پیش تنیده دارای مقاومت بالاتری نسبت به بتن مصرفی در سازه های بتن معمولی می باشد . این مسئله ناشی از آن است که در بتن پیش تنیده، بتن تحت تاثیر تنش های فشاری بیشتری قرار می گیرد و افزایش سطح مقطع به منظور کم کردن تنش ها باعث افزایش وزن سازه و در نتیجه غیراقتصادی شدن طرح می شود . فولادهای پیش تنیدگی (تصویر ۱۱) به سه صورت مفتول (در کارهای پس و پیش کشیده) ، کابل (فقط در کارهای پس کشیده) و دسته میلگردهای آجدار تولید می شوند . تفاوت عمده این نوع فولادها با فولادهای معمولی در نقطه گسیختگی بسیار بالای آنهاست .

رفتار تیرهای پیش کشیده و پس کشیده (تصویر ۱۳) بر حسب نوع اعمال نیروی پیش تنیدگی متفاوت است . در تیرهای پیش کشیده ابتدا مفتول های پیش تنیدگی در محل خود در قالب تیر مستقر شده و در دو انتها توسط مهارهای مخصوصی نگه داری شده و کشیده می شوند و سپس عملیات بتن ریزی در قالب صورت می گیرد . برای ایجاد سرعت در گیرش بتن از مواد افزودنی لازم استفاده شده و عمل آوری بتن توسط بخار صورت می پذیرد . پس از گیرش بتن و کسب مقاومت اولیه ، مفتول ها بریده شده و به واسطه وجود چسبندگی بین مفتول و بتن ، نیروی کششی ایجاد شده بصورت نیروی فشاری بر مقطع بتنی عمل مینماید .

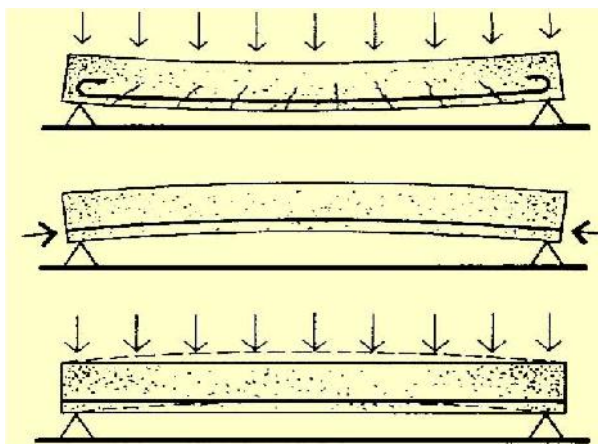
رفتار تیرهای پس کشیده بدین صورت است که در مسیر عبور فولادهای پیش تنیدگی ، غلافی توخالی در بتن تعبیه می شود و عملیات بتن ریزی تیر انجام می شود . پس از کسب مقاومت اولیه بتن ، فولادهای پیش تنیدگی از داخل غلاف ها عبور داده شده و توسط جک هایی که به ابتدا و انتهای تیر متصلند، کشیده می شوند (تصویر ۱۲) . در اثنای این کشش اتلاف تنش های ناشی از کوتاه شدن تیر و اصطکاک مفتول با جدار غلاف رخ می دهد که در محاسبه نیروی جک باید لحاظ شود . (مشکل پل جانبازان رشت) پس از مهار فولادهای پس کشیدگی در دو انتهای تیر ، داخل غلاف در اکثر اوقات عمل تزریق بتن انجام می شود و در نتیجه چسبندگی کامل بین بتن و فولاد بوجود می آید .



تصویر ۱۱- فولادهای پیش تنیده



تصویر ۱۲- جک کشش فولادها

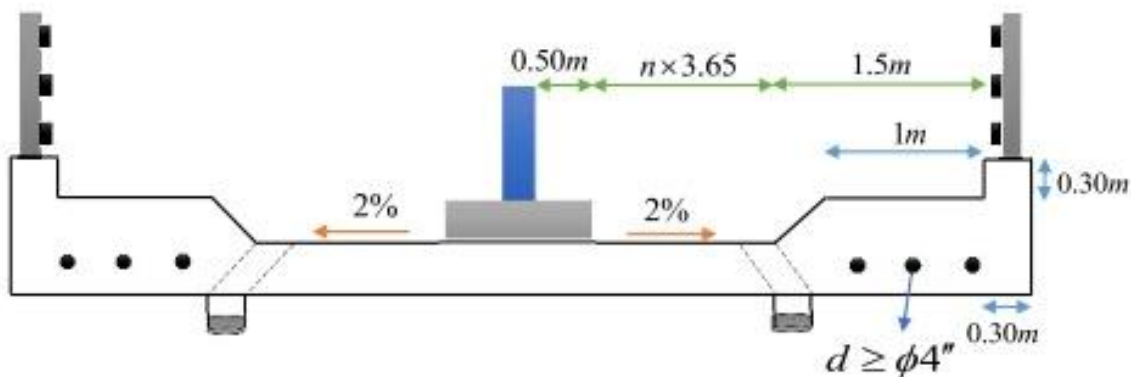


تصویر ۱۳- رفتار تیر پیش کشیده

- عرض پل

آیین نامه آشتو عرض آزاد پل را فاصله خالص بین دو لبه جدول (عرض روسازی) بعلاوه عرض شانه خاکی توصیه می کند . وزارت راه و ترابری ایران، عرض هر خط عبور را در راه های شوسه درجه ۱ ، مساوی ۳/۶۵ متر و در راه های فرعی ۲/۲۵ متر توصیه می نماید . عرض شانه های خاکی نیز بین ۰/۷۵ تا ۳ متر توصیه می شود . بنابراین عرض آزاد پل در راه های درجه ۱ در حدود ۹ متر بدست می آید که بر اساس توسعه های احتمالی آینده و مسائل اقتصادی و نظرات کارفرما انتخاب می گردد .

عرض پیاده روی پل بستگی به حجم افراد پیاده دارد . عرض کافی برای عبور دو فرد پیاده از کنار یکدیگر ۱/۲۵ متر می باشد که بین ۱ تا ۱/۵ متر پیشنهاد می گردد . مقطع عرضی پل شامل سه بخش عرض سواره رو، پیاده رو و جان پناه می باشد .



تصویر ۱۴- مقطع عرضی پل (عبور ۲ طرفه با میانه)

- ارتفاع مفید پل

ارتفاع مفید برای عبور وسایل نقلیه از زیر پل، که از روی آسفالت جاده تا زیر عرشه پل در نظر گرفته می شود، باید حداقل ۵ متر اختیار شود .



تصویر ۱۵- عدم رعایت ارتفاع مفید پل (دهانه های انتهایی)

مهندسی رودخانه و آب شستگی کف رودخانه

طرح و محاسبه و احداث شالوده پایه های پل از مهمترین و حساس ترین مراحل یک پروژه پل سازی می باشد . مخصوصاً وقتی که منظور از ساخت پل، عبور از رودخانه باشد . در انتخاب طول و تعداد دهانه ها و عمق حداقل شالوده های پل، طراح باید یک سری اطلاعات هیدرولوژی و هیدرولیکی را در اختیار داشته باشد . مهندس طراح پل در هنگام طرح پل مورد نظر این عوامل را نباید نادیده بگیرد و در پروژه های مهم وجود مهندس هیدرولوژی لازم و واجب است .

- شکل شناسی رودخانه

رودخانه مسیر هدایت آبی را گویند که در آن آب فقط در یک جهت جریان دارد . رودخانه ها به دو دسته رودخانه های آبرفتی و رودخانه های جاری تقسیم بندی می شوند . رودخانه های آبرفتی با فرسایش سواحل و بستر، هندسه هیدرولیکی خود را متناسب با دبی جریان و رسوبات انتقال یافته از بالادست تطبیق می دهند . در این نوع رودخانه ها ممکن است بر اثر سیلاب، آب از مسیر رودخانه خارج شده و در اراضی چپ و راست رودخانه جریان یابد . رودخانه های جاری در مناطق کوهستانی با شیب بیشتر و دبی جریان بیشتری بوجود می آیند . حمل رسوبات با سرعت بیشتر، بستر را با فرسایش کف روبرو ساخته و عمق آن را افزایش می دهد . به همین دلیل است که سیلاب در این نوع از رودخانه ها کمتر از مسیر خارج شده مگر در محل پیچ های تند و بریدگی ها .

- پایداری رودخانه

رودخانه ها برحسب پایداری بستر به سه حالت زیر طبقه بندی می شوند :

۱ - رودخانه های با بستر صلب (پایدار استاتیکی) : این رودخانه ها به چنان مرحله ای از تکامل رسیده اند که نیروی آب در حال جریان، کافی برای فرسایش بستر و سواحل رودخانه نمی باشد . در چنین رودخانه هایی ممکن است سواحل و کرانه های رودخانه در طی سال های متمادی بدون تغییر باقی بمانند . رودخانه های با بستر سنگی در زمره این طبقه بندی قرار می گیرند .

۲ - رودخانه های رژیم (پایدار دینامیکی) : این رودخانه ها به صورت پیوسته فعال اند . بستر و سواحل خود را فرسوده و یا رسوب گذاری می نمایند . تراز بستر این رودخانه ها معمولاً پایین می نشیند ولی شکل هندسی آنها در پلان تغییر قابل توجهی ندارد .

۳ - رودخانه های ناپایدار : این رودخانه ها به مقدار قابل توجهی رسوب حمل می کنند و بطور پیوسته بستر و سواحل خود را فرسوده و یا در آنها رسوب گذاری می کنند . توده های رسوب گذاری شده مسیر جریان را منحرف کرده و باعث تغییر مسیر رودخانه می شود .

- بستر صغیر و بستر کبیر رودخانه

رودخانه ها در نکثر مواقع سال در بستری جریان دارند که عمیقتر از نواحی فرسایش یافته اطراف است . به این بستر، بستر صغیر می گویند . در هنگام طغیان آب رودخانه بالا آمده و قسمتهایی از نواحی مجاور خود را اشغال می کند . به این بستر، بستر کبیر می گویند . وقتی رودخانه در دره عمیق با سواحلی غیرقایل فرسایش جریان دارد، افزایش دبی در هنگام طغیان با افزایش عمق رودخانه تامین می شود . در این رودخانه ها اختلاف بستر کبیر و صغیر به مراتب کمتر از رودخانه های جاری در دشت می باشد که آب آنها در هنگام طغیان در عرض گسترش می یابد .



تصویر ۱۶- رودخانه جاری



تصویر ۱۷- رودخانه آبرفتی

- اثر پایه های پل بر روی رژیم رودخانه

اضافه نمودن هرگونه مانع در مسیر جریان رودخانه، بر روی خطوط و شدت جریان تاثیر می گذارد که این مسئله به نوبه خود باعث تغییرات در شکل هندسه رودخانه می گردد. برهم زدن خطوط جریان باعث ایجاد جریان های چرخشی می شود که این پدیده فرسایش و آب شستگی موضعی بدنال خواهد داشت. همچنین تنگ و محدود شدن عرض جریان باعث افزایش سرعت جریان و بدنال آن تشدید فرسایش طبیعی می شود. تنگ کردن عرض جریان توسط ایجاد خاکریز بمنظور کم کردن تعداد و طول دهانه مسئله دیگری بنام پشته کردن در بالادست رودخانه را بوجود می آورد که نه تنها باعث زیر آب رفتن اراضی اطراف رودخانه می شود بلکه باعث افزایش خطر تخریب پایه ها و دیواره ساحل می گردد.

- تعیین دبی سیلاب طرح

انتخاب دبی سیلاب طرح یک مسئله هیدرولوژی است و بخصوص در شرایط موجود کشورمان که تاریخچه ثبت آمار بارندگی و رودخانه ها ناقص و کوتاه است، انتخاب یک هدد بعنوان دبی سیل طرح احتیاج به مهارت و ظرافت های خاصی دارد که بیشتر بر عهده یک هیدرولوژیست است تا یک محاسب پل. از اینرو در این قسمت فقط اشاره ای به روش های موجود نموده تا یک دید کلی در ذهن دانشجویان بوجود آید.

طبق تعریف متوسط فاصله زمانی بین وقوع یک رویداد مشخص و رویدادهای بزرگتر یا مساوی آن را دوره بازگشت می نامند. روابط متعددی برای محاسبه دوره بازگشت رویدادها ارایه شده است که معمولترین آنها بصورت زیر است:

$$T_r = \frac{N+1}{m}$$

در رابطه فوق T_r دوره بازگشت، N تعداد سال های دارای آمار و m مرتبه رویداد مورد نظر است. که برای رویداد حداکثر $m=1$ و برای رویداد حداقل $m=N$ می باشد. معمولاً در محاسبات پل، دوره بازگشت سیل طرح از جدول ذیل که بر اساس استاندارد کانادا تهیه شده است، پیشنهاد می گردد.

نوع پل	زمان بازگشت (سال)
پل های راه اصلی	۵۰ تا ۱۰۰
پل های راه فرعی	۲۵
آبروها	۵ تا ۱۰
مجاری فاضلاب شهری	۵

در ایران معمولاً دوره بازگشت ۵۰ تا ۱۰۰ سال معمول می باشد.

پس از انتخاب دوره بازگشت سیل طرح، مقدار دبی سیل طرح رودخانه باید محاسبه گردد که برای محاسبه آن روشهای مختلفی ارائه میگردد :

۱ - تعیین دبی سیل طرح با استفاده از آمار موجود از دبی رودخانه :

اگر در نزدیکی محل مورد نظر برای احداث پل، آمار منظمی از دبی رودخانه (حداقل ۱۰ سال متوالی) وجود داشته باشد، میتوان با استفاده از روش های بسط آماری دبی سیل طرح را با زمان بازگشت مورد نظر محاسبه نمود .

۲ - تعیین دبی سیل طرح با استفاده از آمار بارندگی :

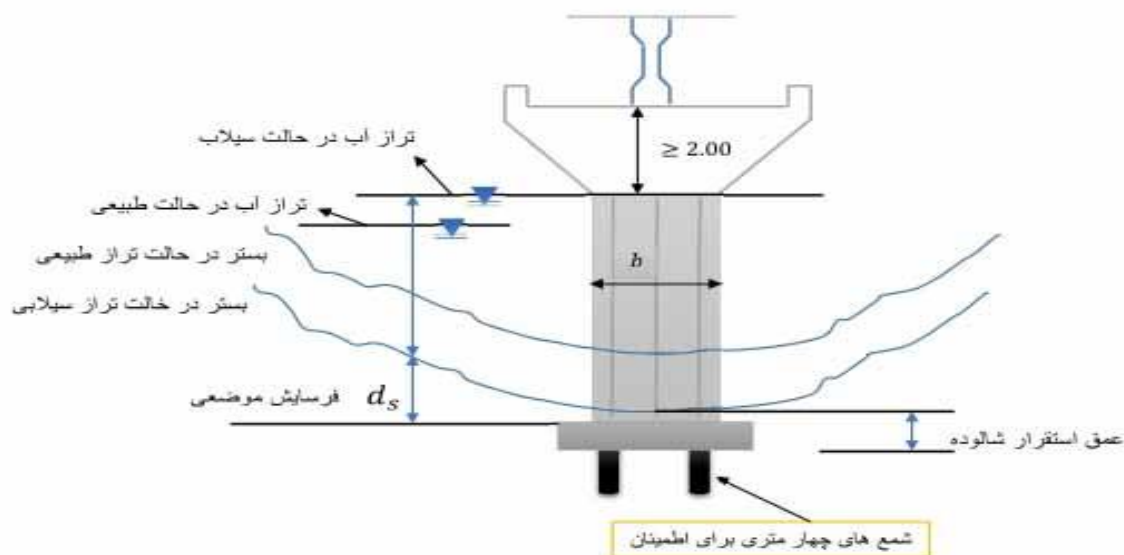
این روش کاری بس دشوار و پیچیده است و احتیاج به مهارت خاصی در رشته هیدرولوژی دارد . لیکن در تعیین ابعاد مجاری آبرو ها و سطوح آبخیز کوچک می توان از این روش استفاده نمود .

- فرسایش موضعی در اطراف پایه های پل

در طراحی و تعیین عمق شالوده پایه های میانی و کناری پل باید توجه خاصی به مسئله فرسایش بستر در اطراف شالوده این سازه ها نمود . بطور کلی در رودخانه ها دو نوع فرسایش مطرح است .

الف-فرسایش موضعی که مثال بارز آن وجود پایه های پل و یا هر مانع دیگر در مسیر حرکت آب می باشد که جریان های چرخشی (گرداب) پدید می آورند .

ب-فرسایش عمومی که به واسطه افزایش دبی، سرعت و در نتیجه افزایش عمق، بوجود می آید . تذکر این نکته لازم به نظر می رسد که طرح مسئله فرسایش و آب شستگی در بستر رودخانه هایی مطرح می باشد که بر روی بستر آبرفتی جریان دارند . در صورتی که جنس بستر سنگی باشد، می توان از عدم فرسایش مصالح در زیر پی پایه ها مطمئن بود .





تصویر ۱۸- فرسایش موضعی پایه های پل

همانطور که در شکل مشخص است، جریان آب در برخورد به پایه بطور قائم انحراف مسیر داده و بطرف بستر جریان پیدا میکند و در برخورد با بستر باعث ایجاد جریان های چرخشی می گردد. از آنجا که سیستم جریان های چرخشی شکل نعل اسب به خود می گیرند، به آن جریان های نعل اسبی نیز می گویند.

- عمق فرسایش موضعی در اطراف پایه ها

عمق فرسایش موضعی در اطراف پایه های پل به موارد مختلفی بستگی دارد که از آن جمله می توان به نوع رودخانه (جاری - آبرفتی)، چگالی آب رودخانه، جنس مصالح بستر رودخانه و شکل هندسی پایه های پل اشاره نمود.

الف - عمق فرسایش موضعی در اطراف پایه های استوانه ای - مصالح دانه ای :

روابط بدست آمده توسط محققین مختلف مربوط به این بخش بر مبنای تئوری و نتایج تجربی است که به برخی از آنها اشاره می کنیم :





$$d_s = 1.11 Y^{0.5} b^{0.5} ; b = \text{قطر پایه پل} \quad \text{بستر ماسه ای - لارسن}$$

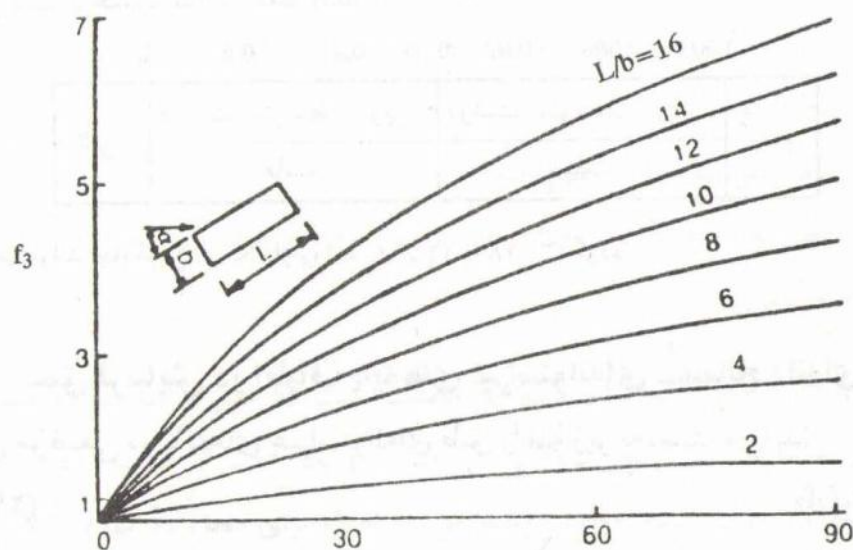
$$d_s = CY ; 0.5 < C < 1 ; Y = \text{عمق متوسط جریان به متر} \quad \text{بستر شن و ماسه ای-لیسی}$$

$$d_s = 0.47 q^{0.8} D^{-0.12} ; q = \text{دبی} ; D = \text{قطر متوسط ذرات} \quad \text{بستر شنی-لیسی}$$

ب - عمق فرسایش موضعی در اطراف پایه های غیر استوانه ای - مصالح دانه ای :

$$d'_s = d_s f_2 f_3 ; d_s = \text{عمق فرسایش در پایه های استوانه ای} ; f_2 = \text{ضریب کجی پایه} ; f_3 = \text{ضریب شکل}$$

شکل مقطع پایه در پلان	طول به عرض مقطع پایه در پلان	f_2
 دایره	1	1
 عدسی‌گونه	2	0.91
	3	0.76
	4	0.67~0.73
	7	0.41
 بیضی	2.0	0.91
	3.0	0.83
 مستطیل	2	1.11
	4	1.40
	6	1.11



همانطور که از نمودار فوق مشخص است، هرچه میزان زاویه انحراف (کجی) پایه پل نسبت به جریان مستقیم آب بیشتر باشد، ضریب f_3 افزایش می یابد که باعث افزایش مقدار عمق فرسایش خواهد شد.

مثال - پلی با اطلاعات زیر در اختیار است، مطلوب است :

الف- تعیین عمق فرسایش موضعی (آب شستگی) در اطراف پایه های پل با فرض پایه های استوانه ای .

ب- تعیین عمق فرسایش موضعی (آب شستگی) در اطراف پایه های پل با فرض پایه های مستطیلی .

عمق متوسط جریان آب رودخانه (Y) ۳ متر - قطر ذرات ماسه ای (D) ۷۸ میلیمتر - طول پایه پل (L) ۴/۸۸ متر - عرض پایه پل (b) ۲/۴۴ متر - زاویه انحراف ۱۰ درجه .

حل :

الف - با استفاده از رابطه لارسن خواهیم داشت :

$$d_s = 1.11 Y^{0.5} b^{0.5} \rightarrow 1.11 (3)^{0.5} (2.44)^{0.5} = 3 \text{ m}$$

ب - با استفاده از جدول و نمودار، ضرایب f_2 و f_3 را تعیین نموده :

- انتخاب طول و تعداد دهانه پل

برای تصمیم گیری طراح در انتخاب تعداد و دهانه یک پل، تمام و یا قسمتی از اطلاعات زیر لازم است :

۱ - اطلاعات نقشه برداری شامل : عکس ها هوایی با مقیاس با هدف تعیین بهترین محل برای عبور از رودخانه، شیب و مساحت حوزه آبخیز، عرض بستر کبیر و صغیر .

۲ - اطلاعات زمین شناسی و ژئوتکنیک شامل : وضعیت ساختمان زمین شناسی (چین - گسل)، جنس رسوبات، اکتشافات اولیه با حفر گمانه های دستی به عمق حداقل ۱/۵ برابر عمق سیلابی .

۳ - اطلاعات هیدرولوژی شامل : اندازه گیری عمق رودخانه و سیلاب طرح با استفاده از روش های تجربی و یا تئوری، شیب سطح آب در بالادست و پایین دست محل پل .

۴ - اطلاعات جمع آوری شده از بازدیدهای محلی شامل : عمق شالوده پل های قدیمی تر، سرعت باد منطقه و ...

- تعیین دهانه کل پل

دهانه کل پل، فاصله بین دو تکیه گاه کناری پل (کوله) می باشد که معمولاً "مساوی عرض رودخانه در هنگام سیلاب حداکثر انتخاب می گردد. این عرض بستگی زیادی به طبیعت رودخانه ای دارد که پل از روی آن عبور می کند. لایسی رابطه زیر را برای بررسی عرض مناسب رودخانه پیشنهاد می کند :

$$B = 4.85\sqrt{Q} \quad ; \quad Q = \text{دبی سیلابی (مترمکعب بر ثانیه)} \quad ; \quad B = \text{عرض رودخانه به متر}$$

حالت دوم زمانی است که طراح تصمیم می گیرد، دهانه پل را کوچکتر از عرض بستر کبیر ظاهری رودخانه در نظر بگیرد. در چنین حالتی درست است که مخارج ساخت پل کاهش می یابد، لیکن مخارج ساحل سازی و دیواره های هدایت آب برای جلوگیری از انحراف مسیر سیلابی، افزایش قابل توجهی خواهد داشت و حتی ممکن است کاهش مخارج کوچک شدن دهانه پل را جبران کند. علاوه بر این، تنگ نمودن مسیر عبور آب باعث افزایش دبی و بدنبال آن افزایش فرسایش عمومی و موضعی بستر رودخانه خواهد شد که افزایش هزینه شالوده را منجر می شود.

- محل قرارگیری پایه های میانی و کناری (کوله ها)

پس از انتخاب دهانه کل، نوبت به تعیین محل تکیه گاه های کناری و میانی می رسد. مواردی از قبیل حداقل فاصله لازم برای عبور کشتی ها در مناطق بندری، عبور تنه درخت و شاخ و برگ آن در مناطق جنگلی، در زمان سیلاب لازم است. از قراردادن پایه های میانی در نواحی عمیق رودخانه اجتناب کنید. اگر بعلت فرسایش بستر احتیاج به پایه های عمیق داشته باشیم بهتر است که طول دهانه را زیاد کرده و از تعداد پایه ها بکاهیم و بالعکس اگر بعلت بستر سنگی بتوان از پایه های کم عمق استفاده نمود، بهتر است طول دهانه را کم کرده و بر تعداد پایه های میانی افزود. بعد از تعیین طول دهانه، سیستم سازه ای عرشه انتخاب می گردد. برای دهانه های بزرگ از سیستم های خرپایی و برای دهانه های متوسط و کوچک از سیستم تیر و دال استفاده می کنند. همیشه سعی کنید که پایه های پل را به موازات جریان آب قرار دهید (تصویر ۱۹) تا خطر فرسایش موضعی در پای شالوده ها را بکاهید.



تصویر ۱۹- آرایش پایه های پل به موازات جریان آب

- عمق شالوده پایه پل

منظور از عمق شالوده، اختلاف تراز زیر شالوده تا تراز بستر فرسایش یافته موضعی می باشد . این عمق نباید از ۱/۲ متر برای پل های صفحه ای و ۲ متر برای پل های قوسی کمتر باشد . در صورت روبرو بودن با بستر غیرقابل فرسایش، می توان این عمق را تا ۱ متر نیز کاهش داد .

- هواکش (Free Board)

هواکش به ارتفاع آزاد بین سطح آب رودخانه و سطح زیرین پل (زیر عرشه) اطلاق می گردد . با توجه به محمولاتی از قبیل تنه درختان، قطعات شناور یخ و ارتفاع مورد نیاز عبور کشتی ها، باید ارتفاع هواکش از مقدار حداقلی کمتر نباشد . در زیر حداقل ارتفاع هواکش بر مبنای دبی حداکثر رودخانه طبق استاندارد کشور هندوستان آورده شده است .

در مناطق جنگلی، حداقل ارتفاع هواکش مساوی ۲ متر توصیه می شود .

دبی (مترمکعب برثانیه)	0.3	0.3-2.8	2.8-28.4	28.4-284	284-2840
حداقل ارتفاع هواکش (سانتیمتر)	15	45	60	90	120



تصویر ۲۰- اندازه گیری مقدار هواکش از روی عرشه پل

- پایه های پل

بارهای وارد بر عرشه پل، از طریق پایه های کناری (کوله) و پایه های میانی به شالوده و سپس از طریق شالوده به زمین منتقل می شود. جنس اغلب پایه ها از بتن مسلح است که در پلهای روگذر ممکن است از پایه های فولادی نیز استفاده گردد.

- شالوده پایه های پل

بسته به شرایط بستر، شالوده بصورت یکی از انواع زیر انتخاب و اجرا می گردد:

۱ - شالوده گسترده: زمانی که جنس بستر مناسب و در عمق مناسبی از بستر طبیعی رودخانه قرار داشته باشد.



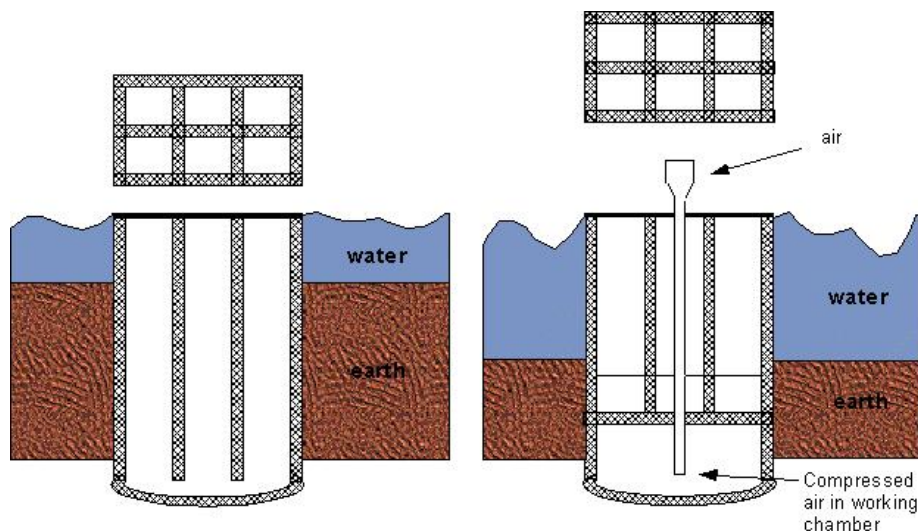
تصویر ۲۱- اجرای شالوده گسترده پایه پل

۲ - شالوده شمعی: در مواقعی که باربری بستر رودخانه کم بوده و خاک با باربری خوب، در عمق زیاد وجود داشته باشد، از این نوع شالوده استفاده می گردد. شمع ها به تعداد و طول کافی در محل مورد نظر کوبیده می شوند و در بالای آنها یک کلاهک یکپارچه از بتن مسلح و بر روی آن پایه قرار داده می شود. در پایه های کناری بمنظور مهار نیروی رانش خاک، امکان اجرای شمع های مایل نیز می باشد. شمع ها می توانند از جنس فولاد، بتن پیش ساخته، پیش تنیده و یا بتن درجا باشند. مهمترین پارامتر در تعیین قطر و طول شمع، جنس خاک محل می باشد که اطلاعات مربوط به آن با گمانه زنی و آزمایشات ژئوتکنیک بدست می آید.



تصویر ۲۲- اجرای شالوده شمعی پایه پل

۳ - شالوده های صندوقه ای : وقتی که عمق آب رودخانه زیاد باشد و شمع های با قطر معمولی جوابگو نباشند، از شالوده های صندوقه ای استفاده می شود . این شالوده ها به دو روش ته بسته و ته باز اجرا می شوند که بسته به مقدار بار وارده و جنس خاک بستر، انتخاب می گردد .



تصویر ۲۳- اجرای شالوده صندوقه ای پایه پل

- پایه های کناری (کوله) پل

برای انتقال واکنش عرشه پل به شالوده و هم بعنوان دیوار حایل خاکریز جاده، عمل می نماید . از بخش های مختلفی تشکیل شده است که با توجه نیاز موحود بکار گرفته می شوند . عرشه حایل، نشیمن و دیوار پیشانی از بخش های مختلف کوله ها بشمار می آیند .

- پایه های میانی پل

این پایه ها در معرض آب شستگی بیشتری قرار دارند . برای محافظت پایه های میانی غلافی از مصالح سنگی یا ورق دور پایه میانی تا ارتفاع سیلاب کشیده می شود . انواع پایه های میانی عبارتند از :

۱ - پایه های میانی وزنی : از مصالح بنایی سنگی و یا بتن غیرمسلح ساخته می شوند . که در صورت استفاده از مصالح بنایی، در بالای پایه یک کلاهی بتنی مسلح بمنظور ایجاد نشیمن زیر عرشه پل باید ساخته شود . عرض کلاهی با توجه به ابعاد بالشتک های نشیمن و ضوابط حداقل عرض نشیمن تعیین گردد . مابین دو بالشتک باید فضای کافی برای انبساط وجود داشته باشد .

۲ - پایه های میانی از قاب صلب : در زمین های با مقاومت کم، پایه های میانی را بصورت قاب صلب میسازند .

تکیه گاه های پل

تکیه گاه پل وسیله ای مکانیکی است که وظیفه آن انتقال واکنش تکیه گاهی عرشه پل به پایه ها می باشد . بعلاوه در بعضی مواقع انتقال نیروهای جانبی نیز به وظایف آن افزوده می شود . تکیه گاه ها با توجه به رفتار طولی پل به سه نوع صلب، مفصلی و غلتکی (انبساطی) تقسیم می شوند . برای مدت زمان طولانی، تکیه گاه ها فقط از فولاد ساخته می شدند ولی در سالهای اخیر با ساخت مواد الاستومر (نظیر نئوپرن)، تکیه گاه ها از این مواد ساخته می شوند . تکیه گاه ها باید در مقابل واکنش های تکیه گاهی مقاومت نموده و در ضمن هیچگونه ممانعتی در مقابل تغییر مکان ها و دوران های طولی پل ایجاد ننمایند . زیرا هرگونه ممانعت در مقابل چرخش باعث ایجاد نیروها و لنگرهای داخلی در عرشه پل می شود . پس بطور کلی می توان گفت که تکیه گاه های پل باید طوری طراحی گردند که دارای مقاومت کافی برای حفظ پایداری عرشه پل باشند .

جزئیات اتکای شاهتیر روی پایه ها، باید احتیاجات زیر را برآورده نماید :

- ۱ - هیچ گونه ممانعتی در مقابل دوران انتهای شاهتیر ایجاد نکند، بنابراین مصالح تکیه گاه باید دارای شکل پذیری زیادی باشند .
- ۲ - هیچ گونه ممانعتی در مقابل تغییر طول شاهتیر بعلت تغییرات درجه حرارت ایجاد نکند . (تکیه گاه های غلتکی-انبساطی)
- ۳ - از لغزش عرشه در مقابل نیروهای اینرسی ناشی از زلزله جلوگیری نماید .
- ۴ - از لغزش عرشه در برابر نیروی ترمز و نیروی محرک، که به صورت افقی در امتداد طولی پل ایجاد می شود، جلوگیری نماید . به همین منظور همواره یکی از دو تکیه گاه انتهایی پل بصورت مفصلی ساخته می شود .

- انواع تکیه گاه

- ۱ - تکیه گاه با جزئیات ساده برای دهانه های کوچک و کم اهمیت :

برای دهانه های حدود ۶ تا ۸ متر که تمهیدات خاصی برای تکیه گاه دال بر روی پایه ها در نظر گرفته نمی شود . در این حالت روی عرشه بتنی یک لایه اساس و آسفالت ریخته می شود .

- ۲ - بالشتک های الاستومر :

این نوع بالشتک ها از لاستیک های مصنوعی مانند نئوپرن ساخته می شوند . بالشتک ها علاوه بر تسلیح داخلی (لایه های متناوب فولاد یا الیاف مصنوعی تقویتی)، ممکن است شامل شاخک هایی متصل به سطوح فوقانی و یا تحتانی و یا هردو باشند . ضریب شکل که معرف میزان فشردگی یا کرنش فشاری بالشتک تحت بار قائم می باشد، ارتباط مستقیمی با ضریب سختی آنها

دارد که در طراحی باید به آن توجه نمود . مراحل طراحی بالشتک های الاستومری عبارتند از :

گام ۱ - تعیین واکنش های تکیه گاهی ناشی از بار مرده و زنده در تیر .

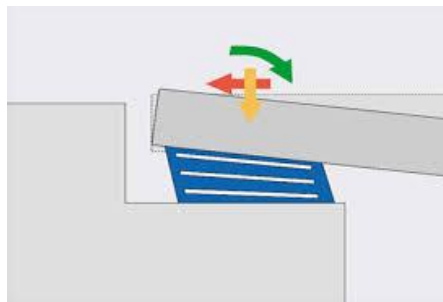
گام ۲ - طرح بالشتک برای تغییرات دمای مفروض . (ضخامت بالشتک نباید از ۲ برابر تغییرمکان افقی، کمتر باشد)

گام ۳ - محاسبه سطح بالشتک بر اساس تنش فشاری مجاز . (ضخامت بالشتک نباید از یک پنجم طول آن تجاوز کند)

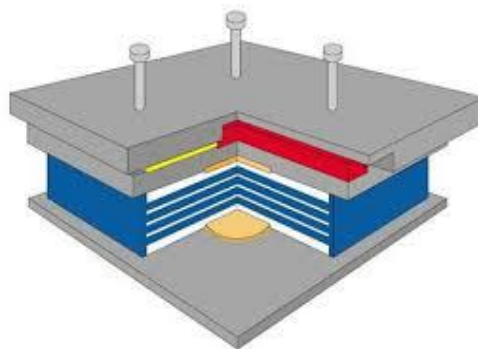
گام ۴ - محاسبه ضریب شکل .

گام ۵ - محاسبه نیروهای طولی ناشی از بار ترافیک .

گام ۶ - تعیین نیروهای وارد بر پایه های میانی و کناری . (تعیین مقاومت برشی بالشتک)



تصویر ۲۴- عملکرد بالشتک های الاستومر



تصویر ۲۵- بالشتک الاستومری مسلح با شاخک



تصویر ۲۶- نصب بالشتک های الاستومری

۳ - تکیه گاه های یاتاقانی :

در پل های فولادی با دهانه بزرگ که مقادیر واکنش های تکیه گاهی و تغییر مکان های طولی بزرگ می باشند، از تکیه گاه های یاتاقانی استفاده می شود . این تکیه گاه ها ممکن است بصورت متحرک، گهواره ای و یا ثابت اجرا شوند . در نوع متحرک امکان حرکت طولی وجود دارد ولی در نوع ثابت، در مقابل حرکت طولی ممانعت ایجاد می شود .

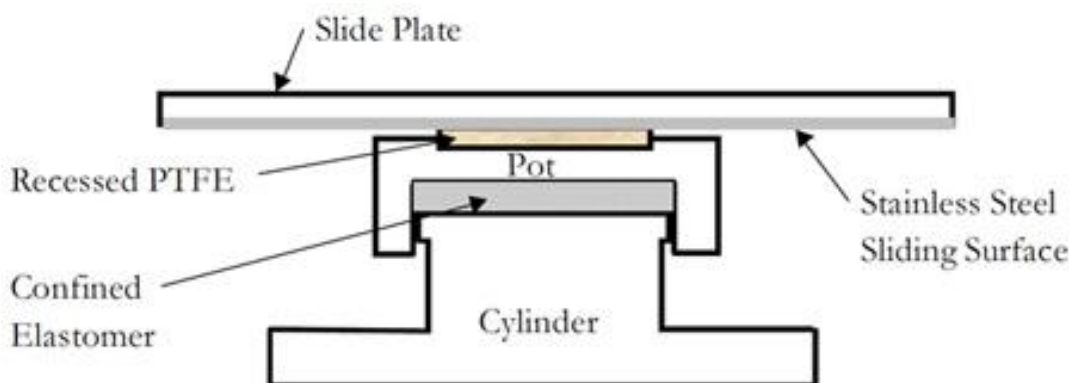
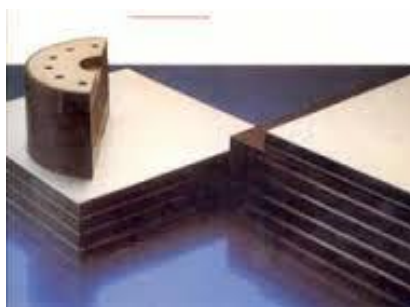
نقطه ضعف تکیه گاه های فولادی، رطوبت است . که برای جلوگیری از ضعف زنگ زدن، سطح خارجی آنها را اندود می کنند و یا از فولادهای مقاوم در برابر زنگ زدگی و خوردگی استفاده می کنند و یا غلتک ها را در یک محفظه لاستیکی قرار می دهند . تکیه گاه های یاتاقانی از قسمتهای زیر تشکیل می شوند :

الف- ورق نشیمن فولادی که بر روی سطح صاف و تراز شده پایه می نشیند .

ب - غلتک ها که امکان تغییر مکان طولی عرشه پل را نسبت به پایه تامین مینمایند .

ج - کفشک های تحتانی و فوقانی که مستقیماً" به زیر تیرهای عرشه پل پیچ می شوند .

گام اول در طراحی یک تکیه گاه فولادی، انتخاب جنس و اندازه غلتک هاست . سایر ابعاد تکیه گاه توسط طول و قطر غلتک کنترل می شود . ابعاد ورق نشیمن بر اساس تنش فشاری مجاز روی بتن و سختی لازم برای توزیع یکنواخت نیروی واکنش تکیه گاهی تعیین می گردد . در مراحل بعدی ابعاد کفشک های تحتانی و فوقانی به گونه ای انتخاب می گردند که دارای آنچنان طول و پهنایی باشند که در تماس کامل با غلتکها قرار گیرند .



تصویر ۲۷- جزئیات بالشتک های یاتاقانی (فولادی)

خطوط تاثیر

مهندسان بندرت با بارهایی که موقعیت آنها ثابت است، سروکار دارند. نمونه بارز این سازه ها پل های جاده ها می باشند که بارهای متحرک ناشی از عبور وسایل نقلیه را تحمل می نمایند. هر قسمتی از سازه برای حالت بحرانی نیروهای موجود طراحی می شوند. لذا مهندس محاسب می باید نیروها را در چنان موقعیت نامساعدی در نظر بگیرد که باعث بوجود آمدن وضع بحرانی در مقطع مورد مطالعه شود. در بعضی موارد تشخیص موقعیت نامساعد نیروها برای ایجاد حالت بحرانی در یک مقطع به سادگی میسر می باشد. لیکن در بسیاری از موارد دیگر این امر ساده نبوده و لازم است به نمودار و یا ملاکی برای تعیین موقعیت نامساعد نیرو متوسل شویم. خطوط تاثیر برای این منظور موثرترین راه حل می باشند.

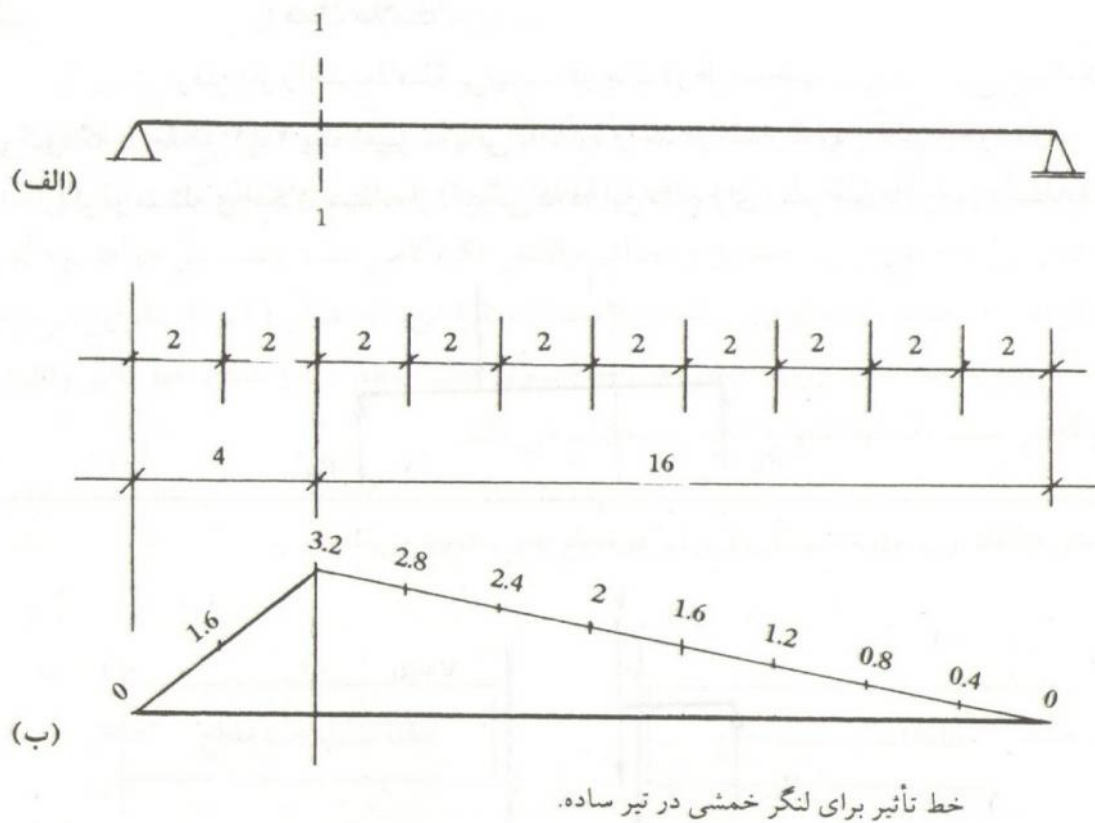
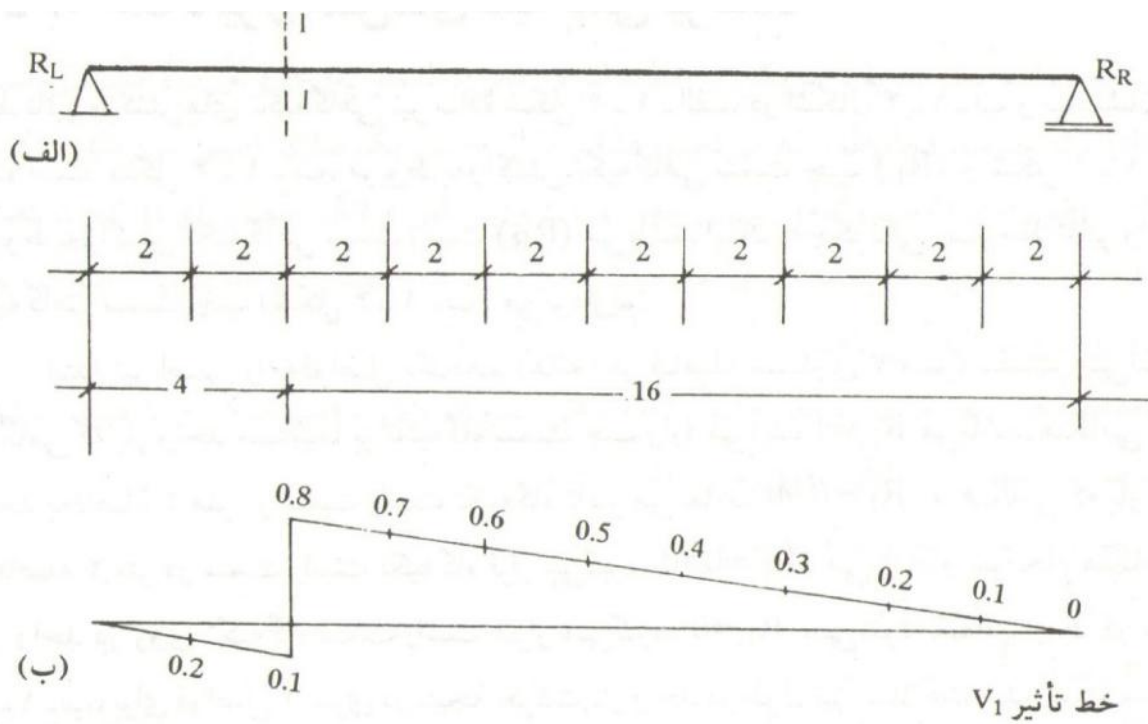
اگر محل مورد نظر برای مطالعه تابع (که می تواند واکنش تکیه گاهی، نیروی برشی، تغییر شکل و...) را یک نقطه مشخص (یک تکیه گاه، مقطعی مشخص و یا عضوی از یک خرپا یا قاب) فرض نماییم و مقدار نیروی موثر را واحد در نظر بگیریم، تنها عامل متغیر، موقعیت نیروی موثر خواهد بود. حال اگر نیروی واحد را در موقعیت های مختلفی روی سازه قرار دهیم و برای هر موقعیت مقدار تابع را در مقطع مورد نظر تعیین نماییم و مقدار بدست آمده را بصورت مختصات y محل تاثیر نیرو بر روی نمودار سازه در نظر بگیریم، از وصل کردن این نقاط، خط تاثیر تابع مورد نظر در مقطع مورد نظر بدست می آید.

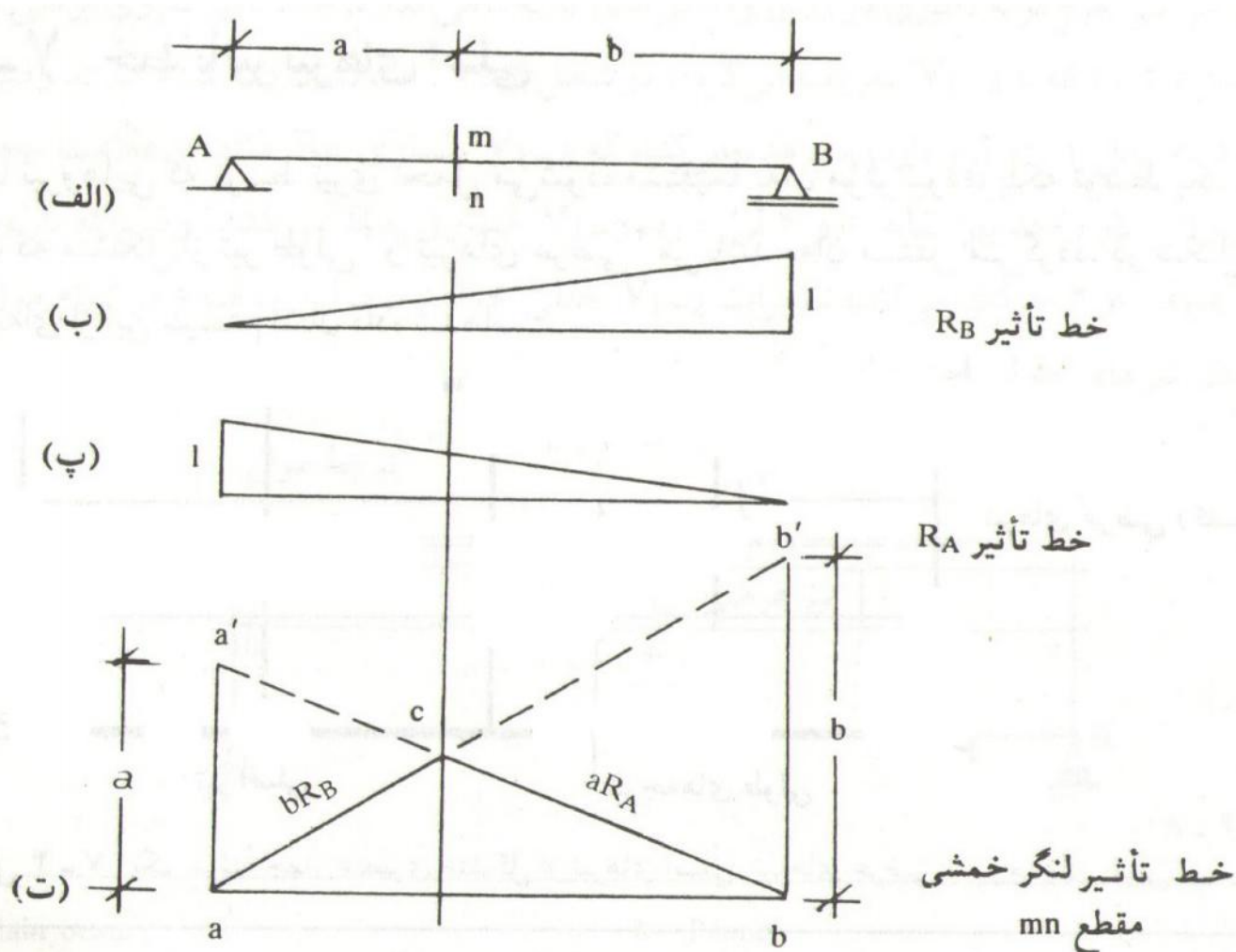
- رسم خطوط تاثیر

در سازه های معین استاتیکی، خطوط تاثیر برای تمام توابع بصورت خط مستقیم می باشند. برای چنین سازه هایی خطوط تاثیر را می توان توسط یکی از روش های زیر ترسیم نمود:

۱- روش محاسباتی (استاتیکی): بار واحد را در چندین نقطه متوالی بر روی سازه قرار داده و برای هر موقعیت بار واحد، مقدار تابع مورد نظر را با استفاده از روابط تعادل استاتیکی محاسبه نماییم. فاصله بار واحد را از یک مبدا دلخواه مساوی X فرض نموده و مقدار تابع را بر حسب X بدست می آوریم. با عبور بار واحد از روی تکیه گاه و یا یک نقطه کلیدی، رابطه خط تاثیر تغییر پیدا می کند.

۲- روش ترسیمی (استدلالی): با کسب تجربه این توانایی در محاسب بوجود می آید تا نقاطی را که در آنها عدم پیوستگی و یا تغییر در شیب ایجاد می کند را تشخیص داده و با وصل کردن نقاط به هم، خط تاثیر سازه مورد نظر بدست آید.





- کاربرد خط تاثیر

از خط تاثیر در دو مورد زیر استفاده می شود:

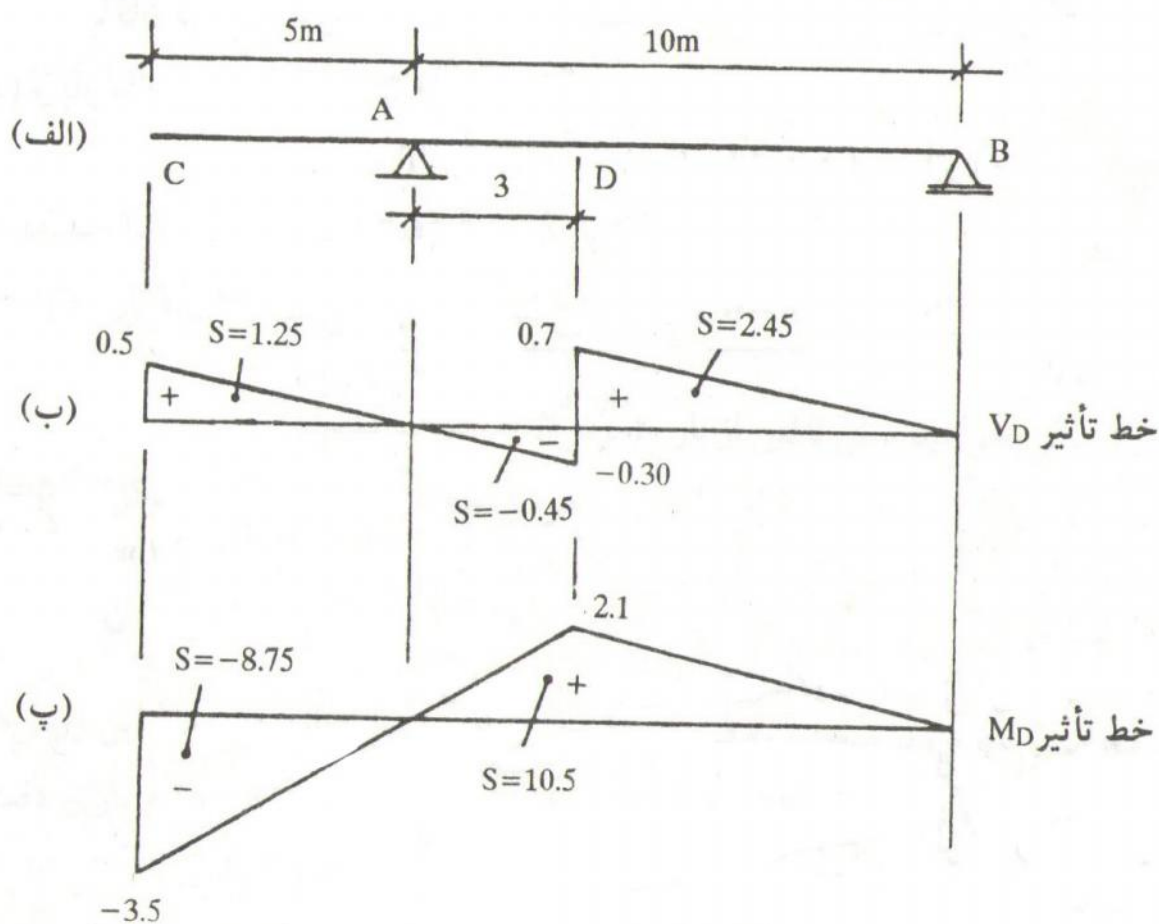
- ۱- مقدار تابع در اثر یک بار متمرکز، مساوی است با حاصلضرب مقدار بار در عرض خط تاثیر آن تابع، در نقطه ای که بار وارد می شود.
- ۲- مقدار تابع در اثر یک بار گسترده، مساوی است با حاصلضرب شدت بارگذاری در مساحت زیر خط تاثیر آن تابع در ناحیه ای که بار گسترده یکنواخت قرار دارد.

برای تیر نشان داده شده در شکل: ابتدا خط تأثیر نیروی برشی و لنگر خمشی مقطع D را رسم نمایید و سپس با توجه به آنها، حداکثر و حداقل نیروی برشی و لنگر خمشی مقطع D را در اثر بارهای زیر تعیین کنید:

۱ - بار مرده گسترده یکنواخت به شدت ۱ تن بر متر

۲ - بار زنده متمرکز به مقدار ۱۰ تن

۳ - بار زنده گسترده یکنواخت به شدت ۵ تن بر متر.



حل:

ابتدا خط تأثیر V_D و M_D را به ترتیب در اشکال (ب و پ) رسم می‌نماییم. با توجه به اینکه در مسئله بار گسترده یکنواخت وجود دارد، مساحت هر قسمت را محاسبه کرده و در روی شکل می‌نویسیم.

محاسبه $V_{D(max)}$

برای تعیین حداکثر نیروی برشی، بار مرده گسترده یکنواخت (که مثلاً می‌تواند وزن تیر باشد) در تمام طول دهانه (از C تا B) باید قرار گیرد. اما بار زنده گسترده یکنواخت، باید در نواحی نیروی برشی مثبت قرار گیرد (ناحیه CA و DB). بار زنده متمرکز نیز باید در محلی قرار گیرد که حداکثر نیروی برشی مثبت تولید شود (طرف راست نقطه D).

$$\begin{array}{rcl}
 \text{اثر بار مرده} & = & 1(1.25 - 0.45 + 2.45) = 3.25 \text{ T} \\
 \text{اثر بار زنده گسترده} & = & 5(1.25 + 2.45) = 18.5 \text{ T} \\
 \text{اثر بار زنده متمرکز} & = & 7 \text{ T} \\
 \hline
 V_{D(max)} & = & 28.75 \text{ T}
 \end{array}$$

محاسبه $V_{D(min)}$

بار مرده کماکان در تمام طول دهانه، بار زنده گسترده یکنواخت در ناحیه منفی خط تأثیر (ناحیه AD) و بار متمرکز در طرف چپ D قرار می‌گیرد.

$$\begin{array}{rcl}
 \text{اثر بار مرده} & \text{(محاسبات فوق)} & = 3.25 \text{ T} \\
 \text{اثر بار زنده گسترده} & = 5(-0.45) & = -2.25 \text{ T} \\
 \text{اثر بار زنده متمرکز} & = 10(-0.30) & = -3 \text{ T} \\
 \hline
 V_{D(min)} & = & -2 \text{ T}
 \end{array}$$

محاسبه $M_{D(max)}$

با حفظ همان اصول فوق داریم:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{اثر بار مرده} & = 1(-8.75 + 10.5) & = 1.75 \text{ T.m} \\
 \text{اثر بار زنده گسترده} & = 5(10.5) & = 52.5 \text{ T.m} \\
 \text{اثر بار زنده متمرکز} & = 10(2.1) & = 21 \text{ T.m} \\
 \hline
 M_{D(max)} & = & 75.25 \text{ T.m}
 \end{array}$$

محاسبه $M_{D(min)}$

اثر بار مرده		$= 1.75$	T.m
اثر بار زنده گسترده	$= 5(-8.75)$	$= -43.75$	T.m
اثر بار زنده متمرکز	$= 10(-3.5)$	$= -35$	T.m
		<hr/>	
		$M_{D(min)} = -77$	T.m

بارهای وارد بر پل

بارهای وارد بر پل به سه دسته عمده تقسیم می شوند :

۱ - بارهای قائم (ثقلی)

۲ - بارهای جانبی

۳ - بارهای خودکرنشی

- بارهای قائم

شامل بارهای مرده، زنده و موارد مشابه می باشند که در امتداد ثقل اثر نموده و عرشه و پایه های پل را تحت تاثیر قرار میدهند . این بارها حاکم بر طراحی عرشه می باشند و از طریق عرشه به پایه ها اعمال می شود .

الف- بارهای مرده : شامل وزن اقلام زیر می باشد :

بارمرده عرشه :

۳- دال بتنی

۲- دیافراگم ها

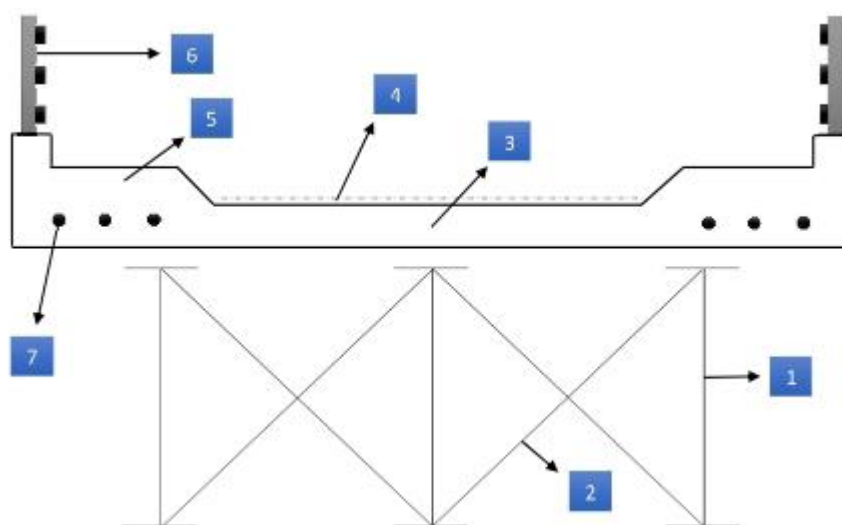
۱ - تیرها

۶- نرده ها

۵- اضافه ضخامت پیاده رو

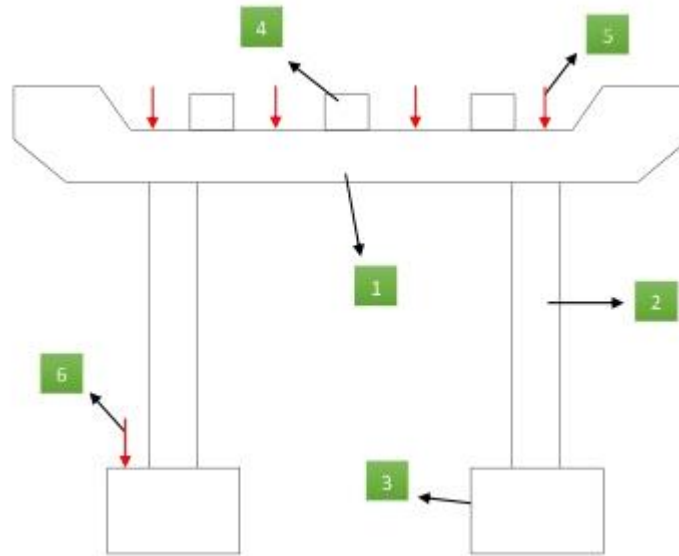
۴- آسفالت

۷- خدمات شهری



بارمرده پایه :

- ۱ - تیرسرسرتون ۲- پایه ها ۳- شالوده ۴- بلوک برشی
- ۵- بارمرده منتقله از عرشه ۶- وزن خاک پشت کوله ها



برای محاسبه بار مرده نیاز به وزن مخصوص مصالح می باشد . وزن مخصوص مصالحی که در مهندسی پل مورد استفاده قرار می گیرند، در صفحه بعد ارائه شده است .

- بارهای جانبی

شامل بارهایی از قبیل بار باد، زلزله، فشار جانبی خاک، نیروی گریز از مرکز، نیروی ترمز و موارد مشابه می باشند که بر عرشه و پایه های پل تاثیر می گذارند و عامل اصلی مقاومت در مقابل آنها، پایه ها می باشند .

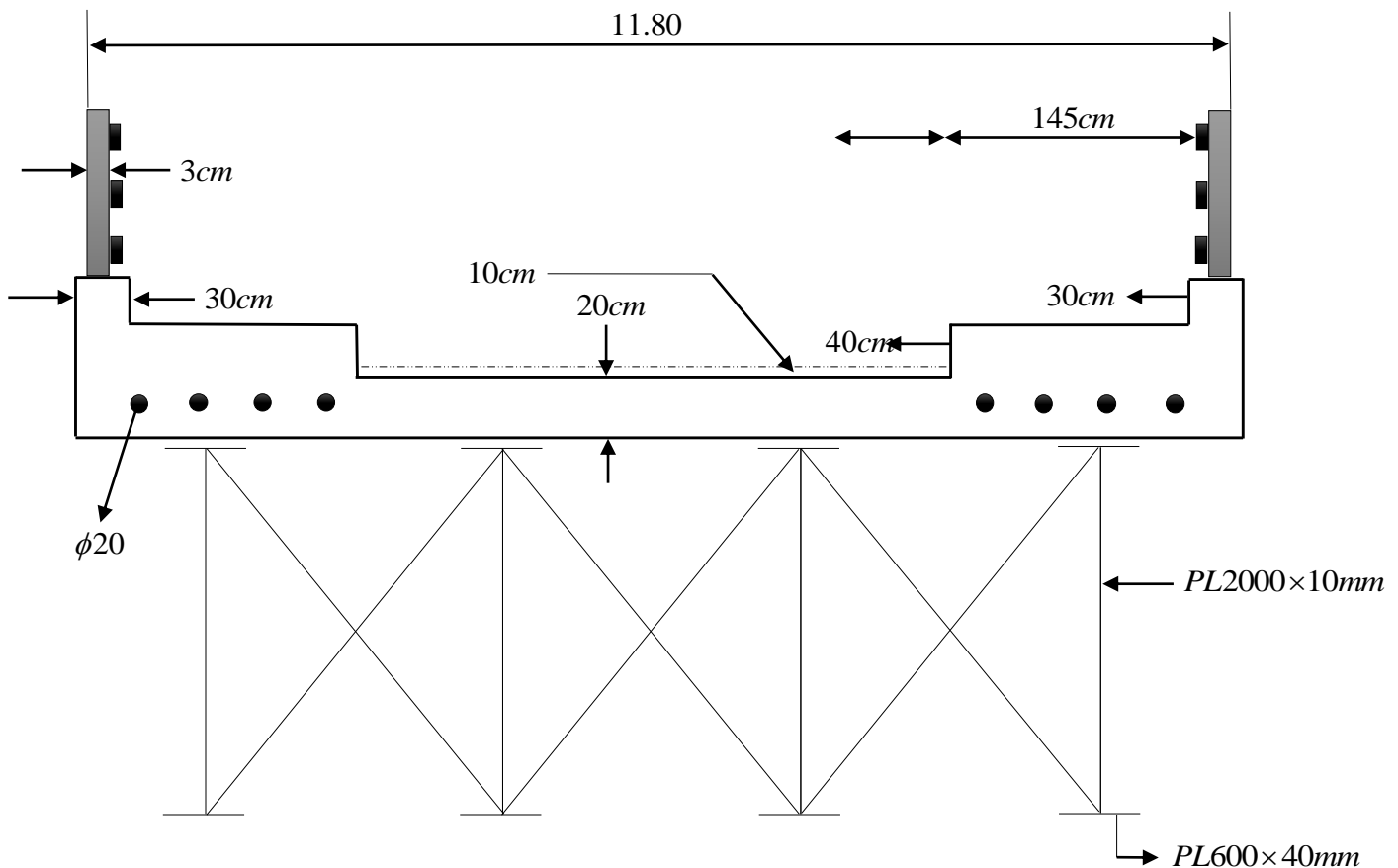
- بارهای خودکرنشی

شامل آثار دما، خزش، تغییر طول ناشی از پیش تنیدگی و موارد مشابه می باشند که می توانند باعث ایجاد تغییر شکل در تمام بخش های سازه پل گردند .

وزن مخصوص چند مصالح بر حسب: ton/m^3

فولاد = 7.85 , چدن = 7.2 , آلومینیم = 2.8 , چوب مقاوم = 0.8 , بتن = 2.4 , بتن مسلح = 2.5 ,
 شن و ماسه متراکم = 1.9 , شن و ماسه غیر متراکم = 1.6 , ماکادام (قلوه سنگ) = 2.25 ,
 سنگ مالون = 2.7 , آسفالت = 2.2

مثال: وزن یک متر طول از عرشه پل نشان داده شده را محاسبه کنید.



حل:

شاهتیر (شاهتیر) سطح مقطع هر تیر ورق : $A = (200 \times 1 + 2 \times 60 \times 4) = 680 \text{ cm}^2$

هرتیر ورق : $w = 680 \times 10^{-4} \times 7850 = 533.8 \text{ kg/m} \approx 0.54 \text{ T/m}$

با احتساب سخت کننده ها : $= 1.1 \times 0.54 = 0.6 \text{ T/m}$

کل شاهتیرها : $w = 4 \times 0.6 = 2.4 \text{ T/m}$

دیافراگم : $= 10\% \times \text{شاهتیر} = 0.24 \text{ T/m}$

$$(عرشه پل) := 11.8 \times 0.2 \times 2.5 = 5.9 \text{ T/m}$$

$$\text{آسفالت} := 0.1 \times 8.3 \times 2.2 = 1.83 \text{ T/m}$$

$$\text{اضافه ضخامت پیاده رو} := \left(2 \times 1.75 \times 0.4 + 2 \times 0.3 \times 0.3 - 8 \times \frac{\pi}{4} \times 0.2^2 \right) \times 2.5 = 2.18 \text{ T/m}$$

$$\text{نردهای پل ها} := 2 \times (0.7 \times 0.03 \times 7.2) = 0.3 \text{ T/m}$$

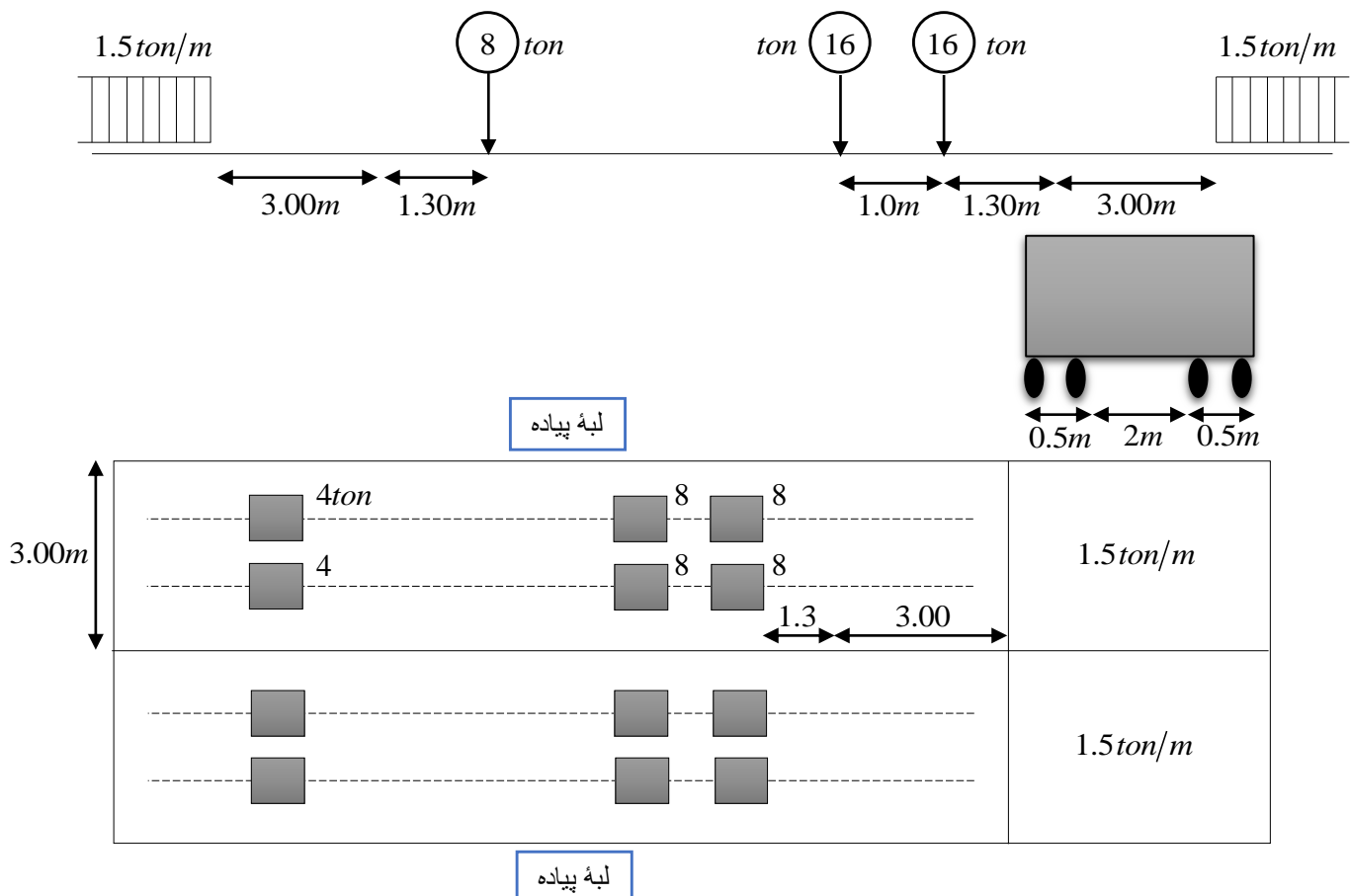
$$12.85 \text{ T/m} : \text{وزن واحد عرشه پل}$$

تعریف بارهای زنده: طبق آیین نامه پل ها بارهای بهره برداری، شامل سه نوع بار فرضی هستند که اثر آنها معادل اثر بارهای واقعی موثر بر اجزای پل می باشد، تعداد و موقعیت این بارها با هدف دست یافتن به بحرانی ترین حالت، با توجه به منحنی های تاثیر نیروهای داخلی بدست می آید، که شامل مشخصات زیر است:

(۱) **بار نوع اول:** این بارگذاری بار عادی نامیده می شود، که معرف اثر محورهای قطار، کامیون و وسایل نقلیه معمولی است، که شامل مشخصات زیر می باشد:

(۱) یک کامیون ۴۰ تنی به طول ۱۰ متر که ۳ متر جلو و عقب آن خالی است.

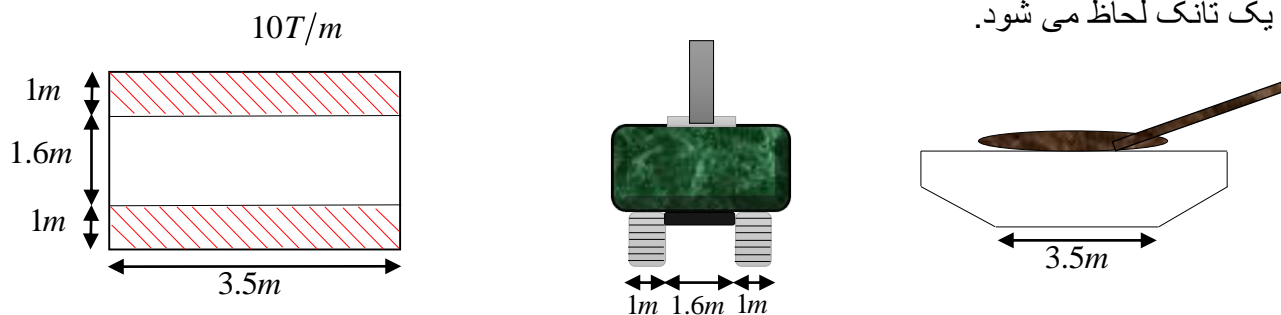
(۲) بار یکنواخت به میزان 1.5 T/m که به طور پیوسته یا ناپیوسته بنا به شرایط بحرانی بر روی عرشه پل وارد می شود، نحوه استقرار این بار عادی مطابق شکل زیر می باشد:



نکته: در مورد پل های عریض در صورتی که هدف پیدا کردن شرایط بحرانی باشد، معمولاً یک ضریب کاهش به بارها در صورت هم زمانی، اعمال می کنند.

(۱) **بار نوع دوم:** معادل 8 تن است که سطح اثر آن مربعی به ابعاد 30 cm می باشد، محدوده آن در حوالی سواره رو متغیر است.

(۲) **بار نوع سوم:** در تمامی پل هایی که امکان عبور تانک و یا تریلی تانک بر وجود دارد باید اثر این بار غیر عادی به شرح زیر در محاسبات لحاظ شود. بار تانک 70 ton بوده، بر روی دو زنجیر به ابعاد 1m × 3.5m برابر شکل، در نظر گرفته می شود. در هر قسمت از عرض سواره رو تنها یک تانک و در طول پل هر 30m متر یک تانک لحاظ می شود.



اثر دینامیکی وسایل نقلیه (اثر ضربه):

وسایل نقلیه چنانچه با سرعت نرمال از روی پل عبور کنند، ایجاد تنش می کنند، که حالتی بزرگتر از حالت استاتیکی دارد، به این افزایش تنش اثر دینامیکی یا ضربه می گویند که به صورت زیر طبقه بندی می شود:

- (۱) اثر نیروی گریز از مرکز به علت عبور وسیله نقلیه از روی پل
- (۲) اثر ناگهانی افتادن چرخ وسیله نقلیه در داخل گودال
- (۳) نیروهای ضربانی یا تپش، در اثر چرخ وسیله نقلیه
- (۴) تاثیر ناگهانی بار زنده که ایجاد ضربه می نماید.

ضریب دینامیکی ضربه: اثر بار عادی 40 ton و بار خطی معادل، همراه آن باید در ضریب ضربه ضرب شود.

برای پل های زیر خاکی

$$\delta = 1.3 - 0.005L - 0.15h \geq 1$$

δ : ضریب ضربه، h : ارتفاع خاکریز روی عرشه پل، L : بر حسب متر و بنا به شرایط زیر تعیین می شود:

(۱) پل های ساده L طول دهانه

(۲) پل های یکسره در محاسبه لنگر خمشی مثبت مقدار L طول دهانه پل است و در محاسبه لنگرهای خمشی تکیه گاهی مقدار L متوسط طول های دو دهانه مجاور.

(۳) در مورد تیرهای عرضی و دال ها L طول دهانه بین دو تیر می باشد.

نکته (برای ضریب ضربه): این ضریب تنها در محاسبه تمامی اعضای عرشه پل منظور می شود، دیوارهای حایل و کوله ها از آن مستثنی هستند.

بارهای پیاده رو: بار 400 kg/m^2 و بار 200 kg/m^2 لحاظ می شود.

بارهای سواره رو: در صورتی که در شرایط استثنائی یکی از چرخ های کامیون با بار 4 ton در سطحی به ابعاد $20 \times 35 \text{ cm}$ بر روی سطح پیاده رو قرار گیرد، می بایست مقدار آن را در طراحی لحاظ کرد.

بار عابر پیاده:

$$P = 200 + \frac{15000}{L + 50} = \dots (\text{kg/m}^2)$$

با توجه به آن اعضای عرشه پل را طراحی می کنیم.

بخش دوم:

بارهای جانبی:

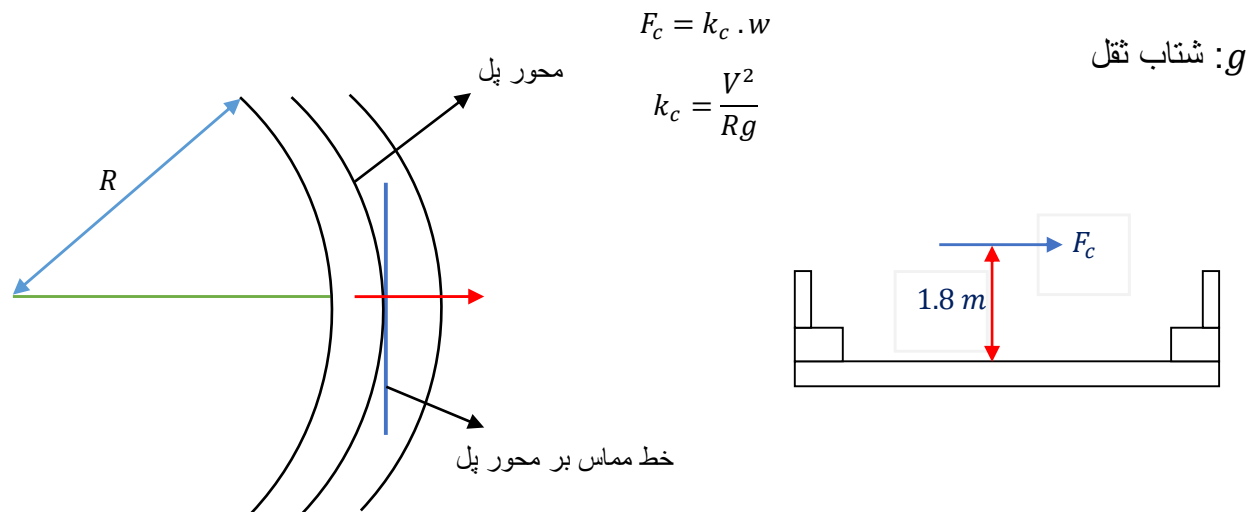
(۱) اثر ترمز: برای تعیین اثر ترمز فرض می شود یک نیروی افقی در یک خط عبور اعمال شود، که از رابطه زیر بدست می آید.

$$F_t = 10 + 0.7L \leq 40 \text{ ton}$$

L : فاصله دو درز انبساط متوالی بر حسب m

F_t : نیروی ترمز بر حسب ton (به این نیرو ضریب ضربه اعمال نمی شود).

گریز از مرکز (جانب مرکز): پل هایی که در قوس افقی قرار دارند برای این نیرو محاسبه می شوند که به صورت افقی در امتداد عمود بر خط مماس محور پل می باشد مقدار این نیرو درصدی از بار زنده کامیون است.

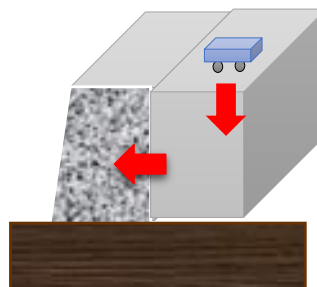
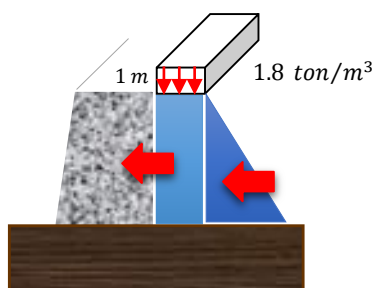


(۱) فشار جانبی خاک:

این مقدار باید بر اعضای پل وارد گردد که معمولاً به پایه های کناری (کوله) اعمال می شود، این پایه ها باید در مقابل نیروی رانش مایلی به وزن مخصوص 500 kg/m^3 را تحمل کنند، چنانچه چرخ وسیله نقلیه بتواند تا فاصله افقی برابر با نصف ارتفاع دیوار حائل به آن نزدیک شود، باید اثر فشار افقی آن بر کوله لحاظ گردد، در هر صورت مقدار این رانش نباید از فشار یک خاک 100 cm با وزن مخصوص 1.8 ton/m^3 حاصل می شود کمتر باشد.¹

مثال:

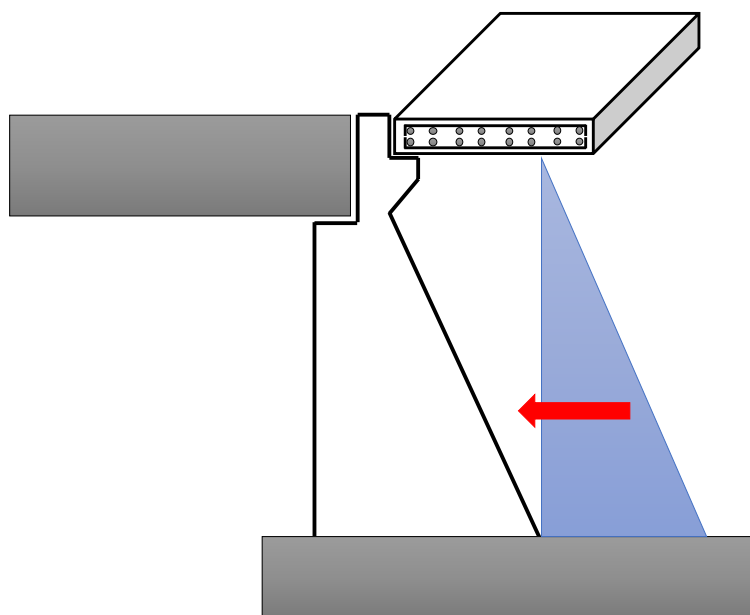
نیروی رانش ناشی از وزن کامیون را که در فاصله ای به اندازه نصف ارتفاع دیوار حائل برای مثال اگر ارتفاع کوله پل 10 m باشد، نصف آن 5 m می شود. اگر کامیون در فاصله 3 m پایه پل ایستاده باشد، پس کمتر از نصف می باشد و اثر فشار افقی کامیون بر کوله لحاظ گردد. اگر همان کامیون در فاصله 7 m ایستاده باشد، این فاصله منظور نمی شود، چون بیش از نصف بوده و وارد حریم 5 m نشده است.



¹ کنترل برای هر دو شکل:

$$\sigma_H = k_a \cdot \sigma_v$$

چنانچه بتوان از دال دسترسی بطور مناسب در پشت پایه پل استفاده کرد، اثر سربار منظور نخواهد شد.



و فقط بار خاکی که پشت دیوار

(کوله) منظور می شود

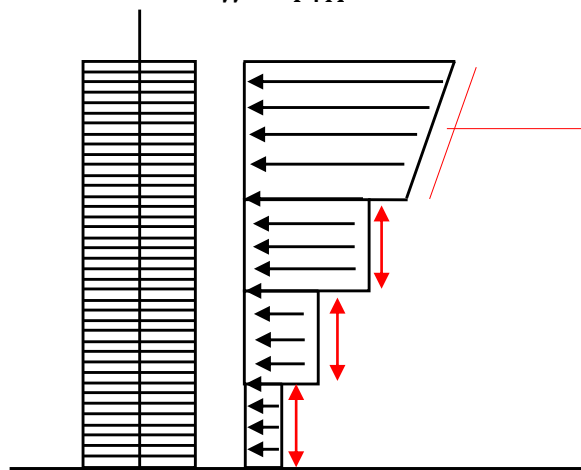
۲) اثر باد: در حالت کلی بار به عواملی چون موقعیت جغرافیایی، ارتفاع منطقه، وضعیت توپوگرافی و مشخصات هندسی پل بستگی دارد.

روش محاسبه:

الف) امتداد باد افقی است و شدت آن روی سطح بادگیر در دوران بهره برداری بدون بار ترافیک (هیچ ماشین روی پل نیست) معادل 250 kg/m^2 و با بار ترافیک 125 kg/m^2 می باشد، نیروی باد بر مرکز ثقل (هندسی) سطح بادگیر اثر می کند، در دو امتداد طولی و عرضی بطور جداگانه وارد می شود اما با هم ترکیب نمی شوند.

پ) نیروی باد: مقدار نیروی باد از رابطه زیر بدست می آید.

$$W = P \cdot A$$

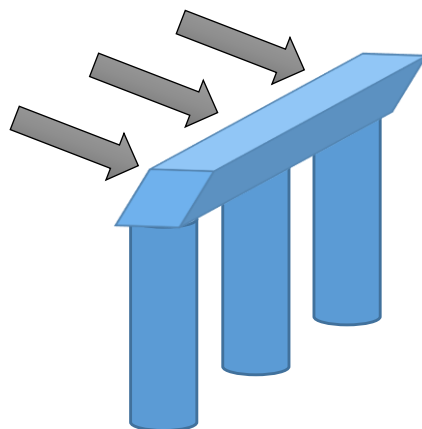
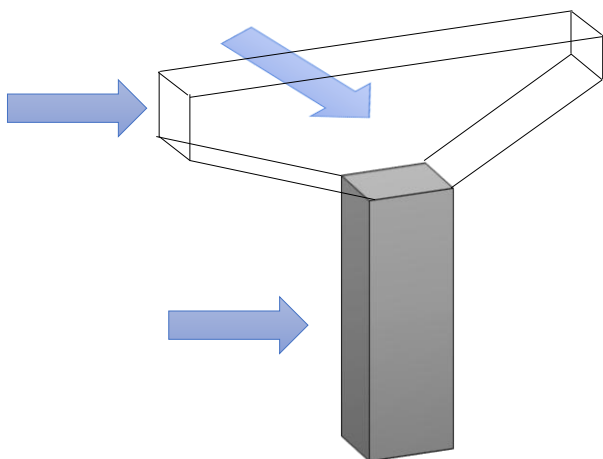


W : نیروی باد

P : شدت بار باد

A : سطح بادگیر

ت) سطح بادگیر پایه ها در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آنها و در امتداد طولی، بزرگترین سطح نمای آن ها است.



مثال: پلی با داده های زیر مفروض است، مطلوب است محاسبه نیروی باد عرضی و طولی وارد بر عرشه و پایه پل، در حالات با و بدون ترافیک. عرض بادگیر هر پایه از وسط تا وسط دهانه مجاور می باشد.

$$A = \left(\sum_{i=0}^n L_i t_i \right) \times 1.5 \rightarrow \text{تیر مشبک}$$

بتنی

برای یک دهانه محاسبه می شود.

$$\text{مساحت پایه} = 1 \times 2 \times 25 = 50 \text{ m}^2$$

$$\text{مساحت سرستون} = 1 \times 2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح جانبی تیر} = 2 \times 40 = 80 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بارگیر وسیله نقلیه} = 2 \times 40 = 80 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر دال و پیاده رو} = (0.2 + 0.2) \times (40) = 16 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر نرده} = 1.5 \left(\left[\frac{40}{3} + 1 \right] \times 1 \times 0.14 + 2 \times 0.2 \times 40 \right) = 26.9 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر عرضی بدون ترافیک} = 80 + 16 + 26.9 = 122.90 \text{ m}^2$$

$$\text{عرشه: } V_W = 122.9 \times 0.25 = 31 \text{ ton}$$

$$\text{پایه: } V_W = (50 + 4) \times 0.25 = 13 \text{ ton}$$

$$\text{سطح بادگیر عرضی با ترافیک} = 80 + 80 + 16 = 176 \text{ m}^2$$

$$\text{عرشه: } V_W = 176 \times 0.125 = 22 \text{ ton}$$

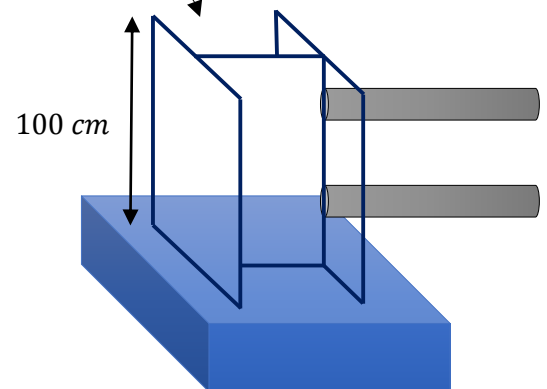
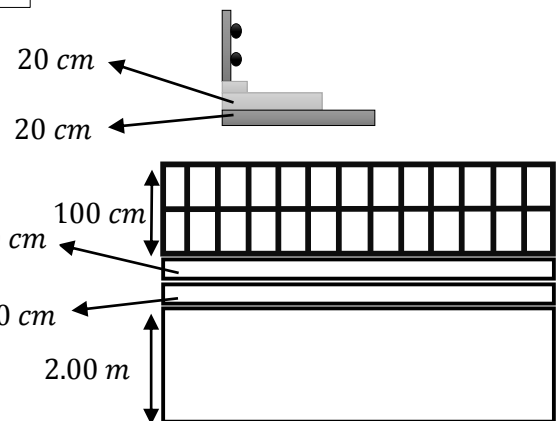
$$\text{پایه: } V_W = (50 + 4) \times 0.125 = 6.75 \text{ ton}$$

در حالت عرضی بار باد بدون ترافیک حاکم بر طراحی است.

$$\text{مساحت پایه ها} = 4 \times 2 \times 25 = 200 \text{ m}^2$$

$$\text{مساحت سرستون} = 18 \times 2 = 36 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح جانبی تیر} = \frac{1}{2} \times 80 = 40 \text{ m}^2$$



$$\text{سطح بارگیر وسیله نقلیه} = \frac{1}{2} \times 80 = 40 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر دال و پیاده رو} = \frac{1}{2} \times 16 = 8 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر نرده} = 26.9 \times \frac{1}{2} = 13.45 \text{ m}^2$$

$$\text{سطح بادگیر عرشه در حالت طولی بدون ترافیک} = 40 + 8 + 13.45 = 61.45 \text{ m}^2$$

$$\text{عرشه: } V_w = 61.45 \times 0.25 = 15.36 \text{ ton}$$

$$\text{پایه: } V_w = (200 + 36) \times 0.25 = 59 \text{ ton}$$

$$\text{سطح بادگیر عرشه در حالت طولی با ترافیک} = 40 + 40 + 8 = 88 \text{ m}^2$$

$$\text{عرشه: } V_w = 88 \times 0.125 = 11 \text{ ton}$$

$$\text{پایه: } V_w = (200 + 36) \times 0.125 = 29.5 \text{ ton}$$

نیروهای ناشی از زلزله:

(۱) تکیه گاه عرشه پل بر روی پایه ها

(۲) پایه های میانی پل: که در اثر نیروی ناشی از وزن مرده عرشه پل در آن ها لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد می شود، که نیروی برشی ممکن است باعث بریده شدن شمع از سرشمع و یا پایه از روی سرشمع گردد.

(۳) پایه های کناری (کوله ها) : که به طور همزمان در معرض افزایش فشار ناشی از ضربه دال و تیر و فشار خاک پشت آن قرار می گیرند.

آیین نامه آشتو (آمریکا): نیروی جانبی در زمان زلزله از رابطه زیر بدست می آید:

$$F = C.W$$

F : نیروی جانبی (زلزله) که به طور افقی بر مرکز ثقل قطعات سازه ای وارد می شود.

W : وزن مرده سازه پل

C : ضریبی است که برای شرایط زیر تعریف می شود:

الف) پل هایی که پایه های آن ها بر روی شالوده های گسترده قرار دارند و زمین محل، حداقل دارای ظرفیت باربری معادل 4 kg/cm^2 باشد: $C = 0.1$

ب) پل هایی که پایه های آن ها بر شالوده های گسترده قرار دارند و زمین محل حداکثر دارای ظرفیت باربری معادل 4 kg/cm^2 باشد: $C = 0.15$

ج) پل هایی که پایه های آنها بر روی شمع قرار دارد: $C = 0.2$

نکته: در محاسبه پل ها در مقابل زلزله، بار زنده به طور کلی منظور نمی شود.

آیین نامه ژاپن:

ضریب C از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = V_1 \times V_2 \times V_3 \times K_0$$

V_1 , $K_0 = 0.2$: ضریب منطقه ای بر حسب زلزله خیزی

اگر ضریب زلزله خیزی منطقه بالا باشد: $V_1 = 1$

اگر ضریب زلزله خیزی منطقه متوسط باشد: $V_1 = 0.85$

اگر ضریب زلزله خیزی منطقه پایین باشد: $V_1 = 0.7$

V_2 : شرایط زمین منطقه:

اگر زمین نوع 1 باشد: $V_2 = 0.9$

اگر زمین نوع 2 باشد: $V_2 = 1$

اگر زمین نوع 3 باشد: $V_2 = 1.1$

اگر زمین نوع 4 باشد: $V_2 = 1.2$

V_3 : ضریب اهمیت (I):

راه اصلی: $V_3 = 1$

راه فرعی: $V_3 = 0.8$

آیین نامه ایران (2800):

نکته: تا زلزله 7 ریشتر در مقیاس اصلاحی مرکالی باید سازه کل بدون آسیب باقی بماند و برای زلزله های تا 9 ریشتر تنها تا مرز فرو ریختن پیش برود.

ضوابط طراحی پل ها برای آیین نامه ایران (2800) برای زلزله :

(الف) پل ها باید در دو امتداد عمود بر هم برای نیروی زلزله طراحی شود و در هر یک از دو امتداد (طولی و عرضی) به نحوی مناسب به شالوده ها وارد شود.

(ب) عرشه پل ها در راه های شوسه و راه آهن معمولاً صلبیت کافی دارند و نیازی به محاسبه این حالت برای بار زلزله نیست، اما به عنوان دیافراگم باید بتوانند نیروی زلزله را به نحو مطلوب به تکیه گاه منتقل کنند.

(پ) کوله پل ها و دیوارهای حائل باید بتوانند فشار خاک اضافی ناشی از زلزله را تحمل کنند.

گروه بندی پل ها از نظر اهمیت:

گروه اول: پل ها با اهمیت زیاد شامل:

(۱) راه های اصلی، آزادراه ها و پل های خطوط راه آهن

(۲) پل های راه های دسترسی به صنایع حیاتی کشور و نظامی

گروه دوم: پل ها با اهمیت متوسط:

(۱) پل های راه های فرعی درجه 1 و خطوط فرعی راه آهن

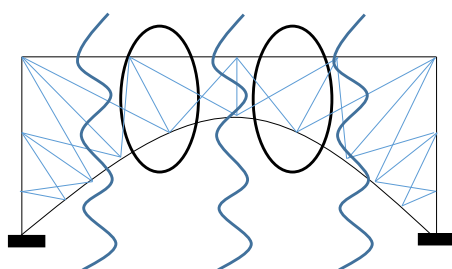
(۲) پل های راه های دسترسی به سایر صنایع (مثال: کارخانه آب معدنی)

گروه سوم: پل های کم اهمیت شامل: راه های درجه 2 و روستایی

گروه بندی پل ها از نظر شکل:

(۱) پل های منظم

(۲) پل های نامنظم:



(۱) پل هایی که توزیع جرم در طول آن ها یکنواخت نبوده و تغییرات ناگهانی داشته باشند.

(۲) پل هایی که سختی پایه های میانی در آن ها یکنواخت نیست.

پل هایی که در پلان قوسی شکل هستند.

محاسبه نیروی زلزله (2800): ۳

نکات:

- الف) در محاسبه پل ها فقط مولفه افقی نیروی زلزله منظور می شود.
- ب) پل ها در دو امتداد عمود بر هم محاسبه می شوند. محاسبه هر یک از این دو امتداد مستقل از هم بوده و اثر آنها همزمان بر روی پل تاثیر نمی شود (عرضی یا طولی)
- ۳) نیروی زلزله به صورت رفت و برگشت لحاظ می شود.
- ۴) پل ها در برابر زلزله و باد به تفکیک محاسبه شده، اثر هر کدام بیشتر است ملاک طراحی است.

بارزنده:

- الف) در محاسبه نیروی زلزله در صورتی که مقدار بار زنده کمتر از نصف بار مرده عرشه باشد، بار زنده لحاظ نمی شود. در غیر اینصورت $2/3$ مجموع بار مرده و زنده عرشه منظور می شود.
- ب) در محاسبه نیروی جانبی زلزله در پل های شهری همیشه حداقل نصف بار زلزله منظور می شود.

روش محاسبه پل ها در برابر زلزله:

الف) برای پل های معمولی به یکی از ۳ روش زیر انجام می شود:

- ۱) روش تحلیل استاتیکی معادل
 - ۲) روش تحلیل دینامیکی طیفی (با استفاده از آنالیز مدها و بازتاب طرح)
 - ۳) روش تحلیل دینامیکی با استفاده از شتاب نگاشت ها
- چنانچه دهانه پلی کمتر از 100 m و ارتفاع پایه های آن کمتر از 30 m باشد، می توان از روش تحلیل استاتیکی معادل استفاده کرد و برای غیر از موارد فوق و همچنین پل های معلق (یک پل معمولی ولی دهانه اش از ۱۰۰ متر بیشتر یا ارتفاعش بیش از ۳۰ متر است)، باسکولی، ترکه ای، و پل های قوسی از روش شبه دینامیکی و یا دینامیکی استفاده می شود.

(۱) روش تحلیل استاتیکی معادل: در این روش نیروی جانبی زلزله بر مبنای زمان تناوب اصلی نوسان پل و با استفاده از طیف بازتاب طرح تعیین می شود. این نیرو با توجه به شکل نوسان پل در طول پل

$$C = \frac{ABI}{R} \geq 0.25A \text{ می آید: مقدار } C \text{ از رابطه زیر بدست می آید:}$$

A : شتاب بر مبنای طرح , B : ضریب بازتاب پل , I : ضریب اهمیت پل , R : ضریب رفتار پل

نکته: در پل هایی که دارای پایه های سنگی یا بتن بدون آرماتور هستند ضریب جانبی زلزله $C = 0.8A$ منظور می شود:

توصیف	شتاب بر مبنای طرح A
منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد	0.35
منطقه با خطر نسبی زیاد	0.3
منطقه با خطر نسبی متوسط	0.25
منطقه با خطر نسبی پایین	0.2

ضریب B :

$$0.6 \leq B = 2.5 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \leq 2.5$$

T : زمان تناوب اصلی نوسان پل بر حسب ثانیه (Sec)

T_0 : از جدول زیر بر حسب نوع زمین بدست می آید.

نوع زمین	مقدار T_0
1	0.4
2	0.5
3	0.7
4	1

زمین نوع 1: سنگ های آذرین , سنگ های رسوبی بسیار مقاوم , سنگ های دگرگون و طبقات کنگلومرایی شامل شن و ماسه

زمین نوع 2: سنگ های آذرین سست , سنگ های دگرگون متورق , طبقات کنگلومرایی شن و ماسه با تراکم متوسط و رس متراکم

زمین نوع 3: سنگ های متلاشی شده در اثر هوازدگی , طبقات شن و ماسه با پیوند ضعیف بین دانه ای (در شمال , نواحی ساحلی)

زمین نوع 4: نهشت های نرم با رطوبت زیاد در اثر بالا بودن سفره آب زیر زمینی (گلسار رشت) یا طبقات شن و ماسه با پیوند ضعیف بین دانه ای و رس متراکم نشده.

نکته برای رابطه B در صفحه قبل: در زمین های نوع 4 مقدار B باید ۳۰٪ افزایش یابد, لیکن این مقدار نباید از عدد 2.5 بیشتر گردد.

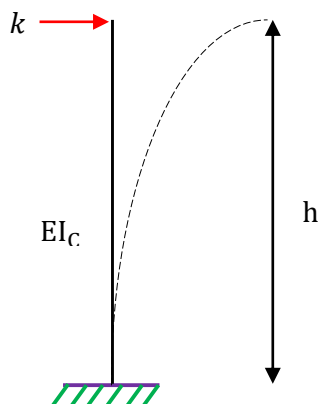
$$\text{نوع 4} \leftarrow 1.3B \leq 2.5$$

مقدار T : زمان نوسان اصلی پل ها از رابطه زیر بدست می آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{w}{kg}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 0.21 \sqrt{\frac{w}{k}}$$

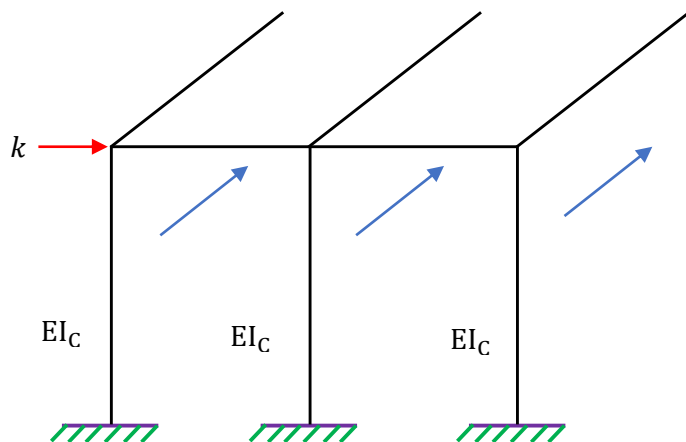
k : سختی جانبی پل در جهت مورد نظر که از تقسیم نیروی جانبی فرضی که در مرکز جرم عرشه پل وارد می شود به تغییر مکانی که در عرشه پل ایجاد می شود بدست می آید.

m : جرم عرشه پل w : وزن عرشه پل g : شتاب ثقل



پایه تک ستونی

$$k = \frac{3EI_C}{h^3}$$

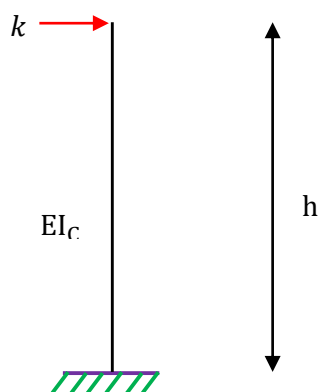


پایه چند ستونی در امتداد عرضی

$$I_b = 0 \rightarrow k = \sum_{i=1}^n \frac{3EI_c}{h^3}$$

$$I_b = \infty \rightarrow k = \sum_{i=1}^n \frac{12EI_c}{h^3}$$

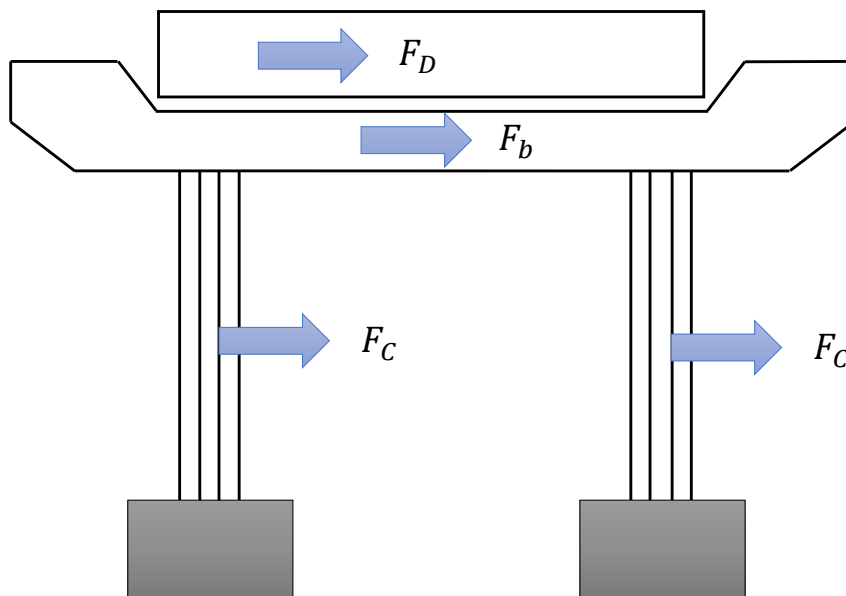
پایه چند ستونی در امتداد طولی :



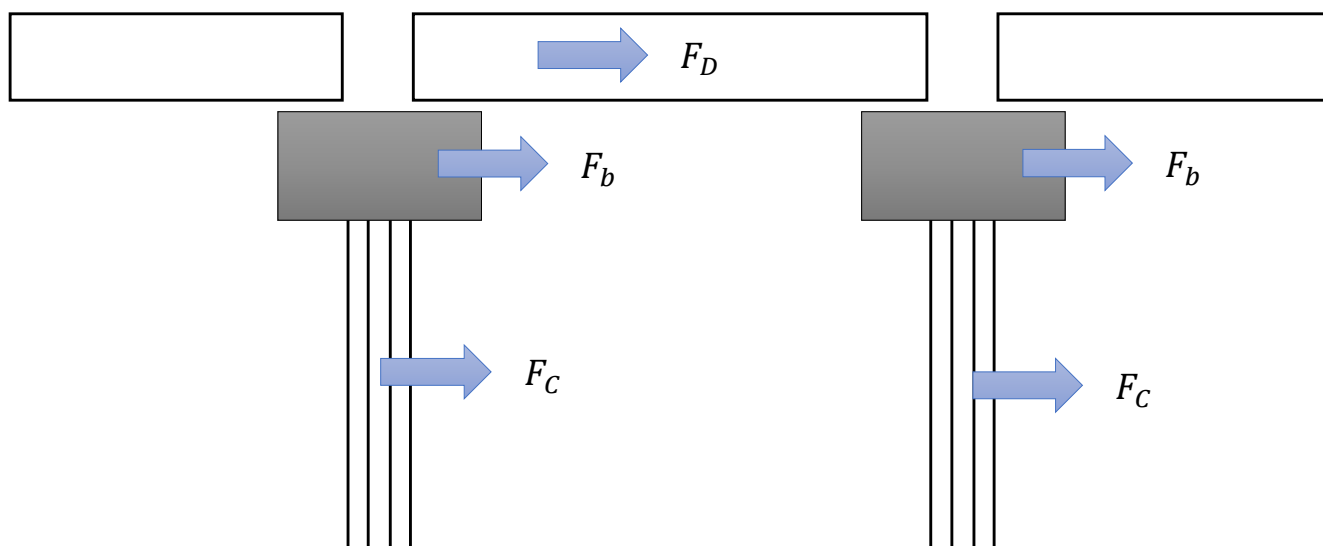
$$k = \sum_{i=1}^n \frac{3EI_c}{h^3}$$

جدول اهمیت پل (I) در فرمول $C = \frac{ABI}{R}$:

مقدار I	ضریب اهمیت
1.2	زیاد
1	متوسط
0.8	کم



(مولفه عرضی نیروی زلزله)



(مولفه طولی نیروی زلزله)

$$F = F_D + F_b + F_C$$

$F_D = CW_D$ نیروی زلزله عرشه پل

$F_b = CW_b$ نیروی زلزله سر ستون

$F_C = CW_c$ نیروی زلزله ستون

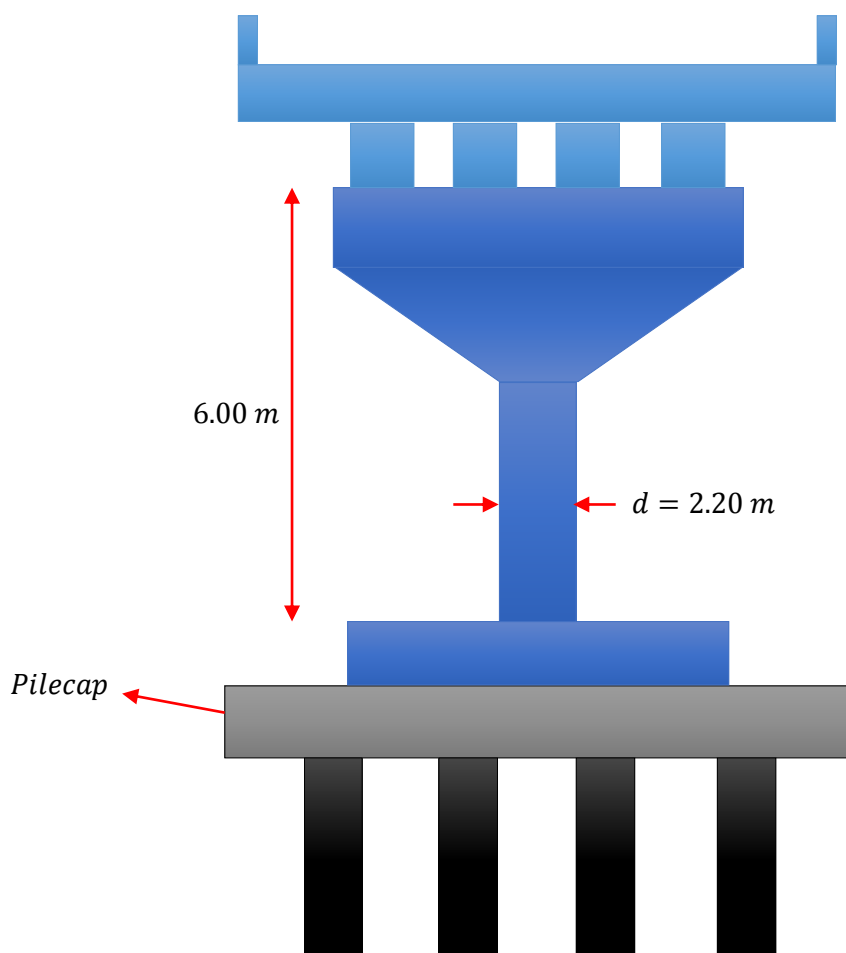
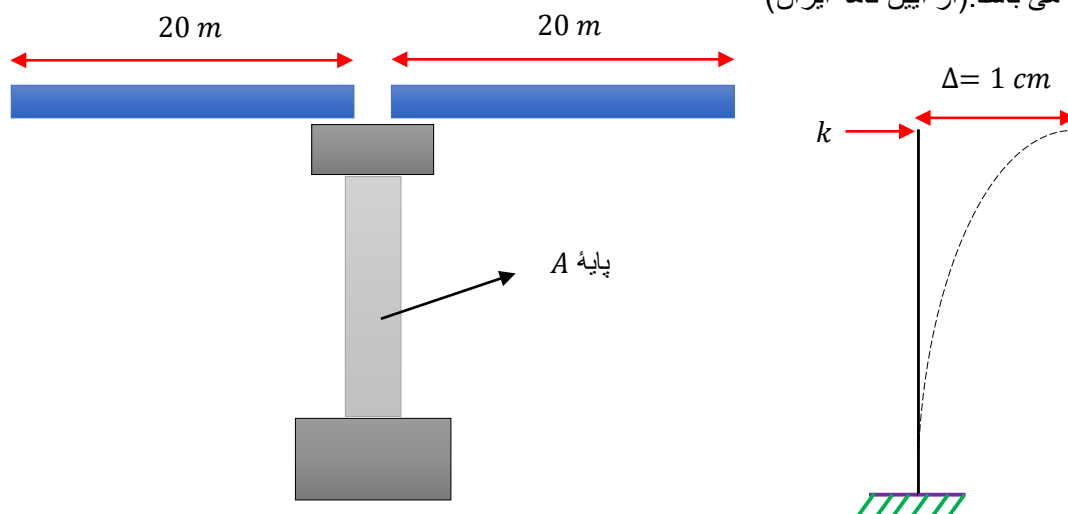
W_D وزن عرشه پل

W_b وزن سر ستون

W_c وزن ستون

مثال: مطلوب است تعیین نیروی زلزله در امتداد عرضی برای پایه میانی A مطابق شکل وزن مرده عرشه پل شامل تیر و دال
 16 t/m بوده و نوع زمین 1 می باشد. (از آیین نامه ایران)

دایره ای است



نوع پایه	ضریب رفتار R
1. پایه های دیوار بتن آرمه	3
2. پایه های تک ستون یا پایه هایی که رفتار مشابه تک ستون دارند	4
3. پایه های چند ستونی	6
4. شالوده ها - سرشمع یا پایل کپ	نصف مقدار R در محاسبه پایه ها
5. اتصال عرشه به پایه و کوله	نصف مقدار R در محاسبه پایه ها

$$A = 0.35, \quad I = 1, \quad R = 4 \text{ تک ستون}, \quad T_0 = 0.4, \quad K = \frac{3EI\Delta}{h^3}$$

$$E = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \quad D = \Delta = 1 \text{ cm}, \quad h = 600 \text{ cm}, \quad I = \frac{\pi r^4}{4} = 1.15 \times 10^8 \text{ cm}^4$$

ممان اینرسی دایره

$$K = \frac{3 \times 2.1 \times 10^5 \times 1.15 \times 10^8 \times 1}{600^3} = 3.35 \times 10^5 \text{ kg}$$

$$\text{ستون ها} = 40 \text{ ton}$$

$$50 \text{ ton} \approx \text{وزن تمام سرستون} + \text{معمولا } 25\% \text{ وزن ستون ها}$$

$$\text{سرستون ها} = 40 \text{ ton}$$

$$W = 16000 \times 20 + 50000 = 37 \times 10^4 \text{ kg}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{37 \times 10^4}{3.35 \times 10^5 \times 9.81}} = 0.21 \text{ sec}$$

$$B = 2.5 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.67} = 2.5 \left(\frac{0.4}{0.21} \right)^{0.6} = 3.85 \rightarrow B = 2.5$$

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.35 \times 2.5 \times 1}{4} = 0.22$$

$$F = C.W$$

$$F_D = 0.22 \times (16 \times 20) = 70.40 \text{ ton} \text{ زلزله در عرشه}$$

$$F_b = 0.22 \times 40 = 8.8 \text{ ton} \text{ زلزله در سرستون}$$

$$F_c = 0.22 \times 40 = 8.8 \text{ ton}$$

زلزله در ستون

همزمانی بارها:

گروه 1: بارهای شامل بار مرده اثر کاهش وزن پل ناشی از غوطه وری تغییر شکل مصالح (جمع شدگی و وارفتگی نشست پایه ها و فشار خاک)

گروه 2: شامل گروه 1 + بارهای بهره برداری همراه با ضربه ترمز و گریز از مرکز

گروه 3: الف) گروه 1 + اثر باد طولی و عرضی ، ب) شامل گروه 2 + اثر باد طولی و عرضی

گروه 4: الف) گروه 1 + اثر تغییر دما ، ب) شامل گروه 2 + اثر تغییر دما

گروه 5: گروه 1 + زمین لرزه

گروه 6: گروه 1 + بارهای ویژه

ترکیبات بارگذاری (به روش تنش مجاز):

گروه	ترکیب بار	تنش مجاز بر حسب درصدی از تنش مجاز پایه
1	$D + B + R + S + ST + PF + SF + E$	100%
2	$L + I + LF + CF$ + گروه 1	100%
3	الف) W + گروه 1 ب) $W + WL$ + گروه 2	133% 133%
4	الف) T + گروه 1 ب) T + گروه 2	133% 133%
5	EQ + گروه 1	133%
6	بارهای ویژه + گروه 1	طبق نیاز

معمولا گروه 5 و 2 غالب هستند.

نیروی غوطه وری: B , فشار زمین: E , بار ضربه ناشی از بار زنده: I , بار زنده: L , بار مرده: D :

نیروی پیش تنیدگی: PF , بار باد بر روی خودروها: WL , بار باد بر روی سازه (پل): W :

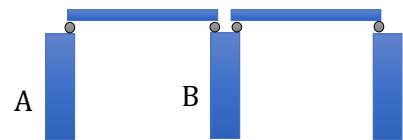
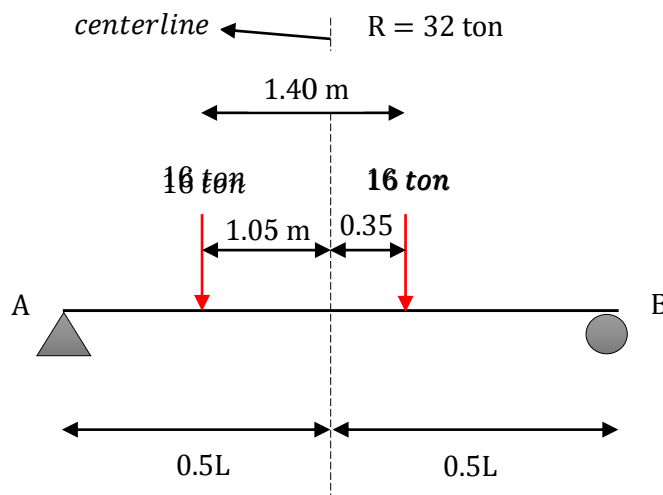
نیروی گریز از مرکز: CF , نیروی ترمز: LF , نیروی ناشی از نشست تکیه گاهی: ST :

نیروی زلزله: EQ , نیروی حاصل از افت مصالح: S , نیروی حاصل از کوتاه شدن قوس: R :

نیروی جریان رودخانه: SF , نیروی تغییرات دما: T :

بارگذاری پل ها:

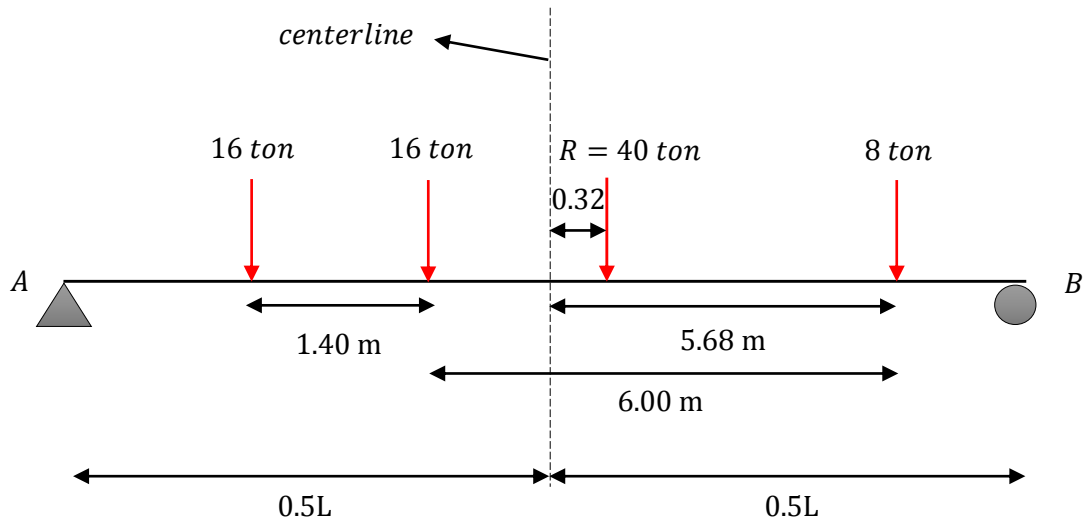
الف) برش و لنگر حداکثر برای یک کامیون 40 ton به همراه بار خطی با دهانه کمتر از 10 m :



$$0.5L < 5.68\text{ m}$$

$$R_A = 32 \times \left(\frac{0.5L + 0.35}{L} \right)$$

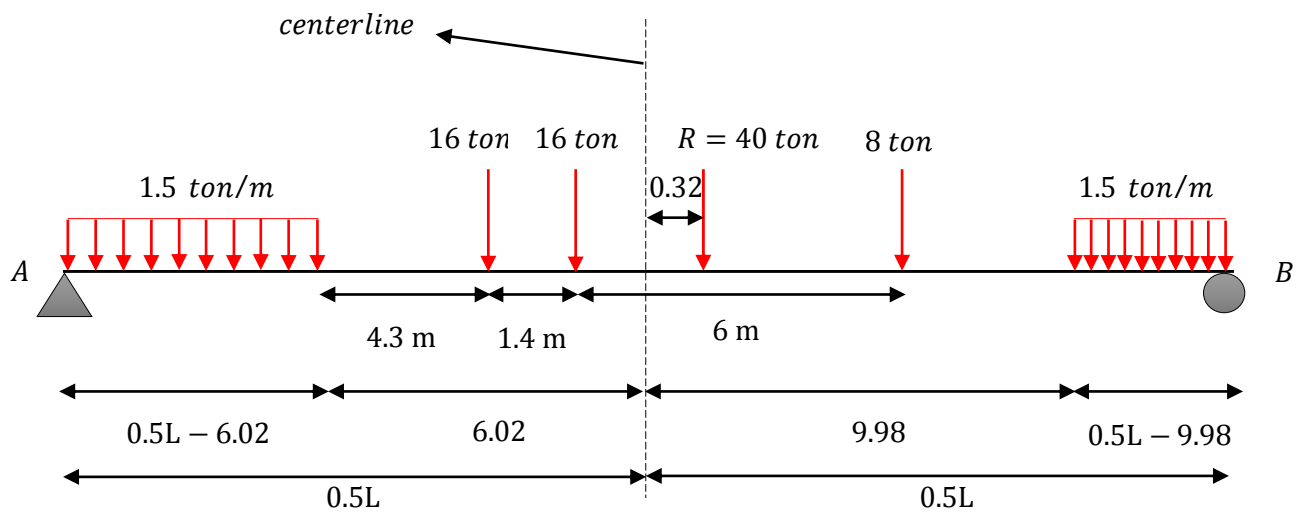
$$m_{max} = R_A(0.5L + 0.35) - 16 \times 1.4 \quad L < 10\text{ m}$$



$$0.5L > 5.68 \text{ m}$$

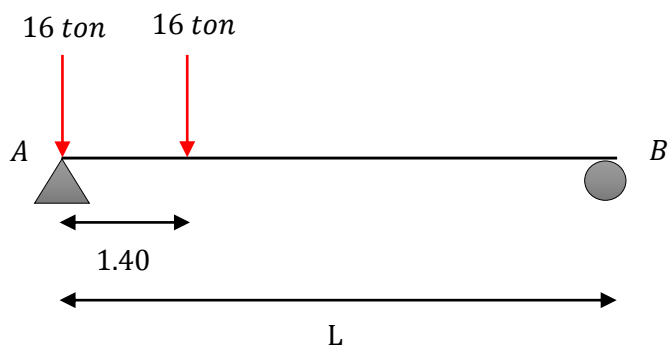
$$R_A = 40 \times \left(\frac{0.5L + 0.32}{L} \right)$$

$$m_{max} = R_A(0.5L - 0.32) - 16 \times 1.4 \quad 10 \text{ m} < L < 20 \text{ m}$$

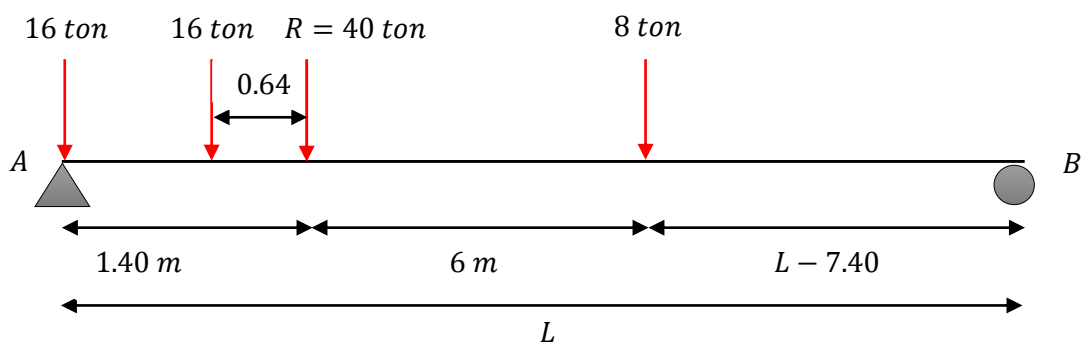


$$R_B = \frac{20L + 12.8 + 0.75(0.5L - 6.02)^2 + 1.5L(0.5L - 9.98) - 0.75(0.5L - 9.98)^2}{L}$$

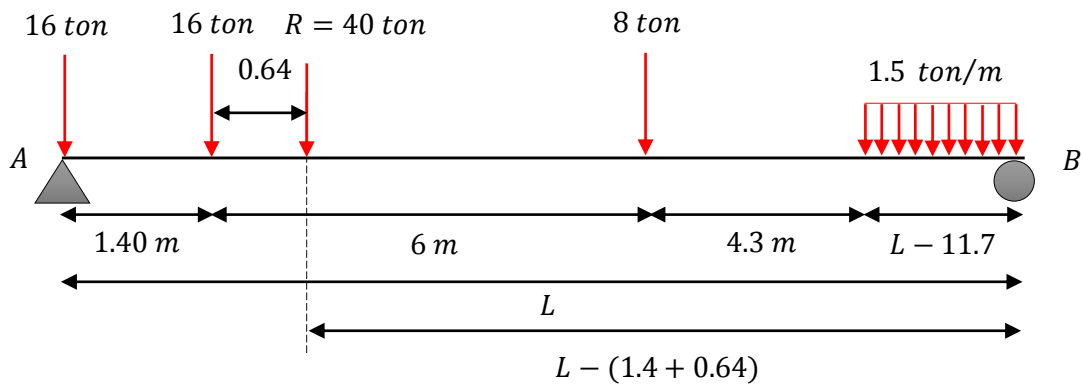
$$m_{max} = R_B(0.5L + 0.32) - 8 \times 6 - 1.5(0.5L - 9.98) \times [0.5L + 0.32 - 0.5(0.5L - 9.98)] \rightarrow L > 20 \text{ m}$$



$$V_{max} = 16 + 16 \times \left(\frac{L-1.4}{L} \right) \quad L < 7.4 \text{ m}$$



$$V_{max} = 40 \left(\frac{L-2.04}{L} \right) \quad 7.4 < L < 11.70 \text{ m}$$



$$V_{max} = \frac{40(L-2.04) + 0.75(L-11.7)^2}{2} \quad L > 11.70 \text{ m}$$

بارهای تانک :

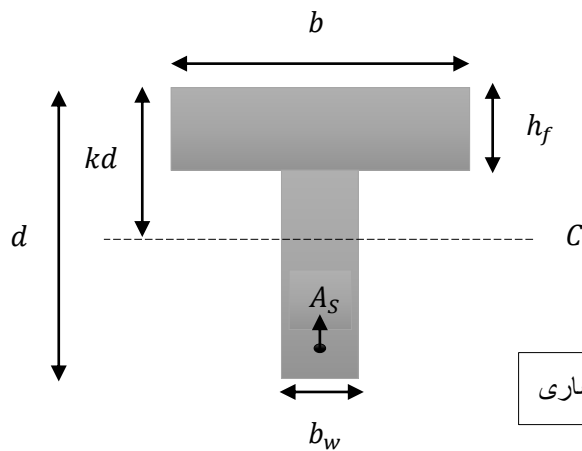
$$M_{max} = 2.5L^2 \quad L \leq 3.50 \text{ m}$$

$$M_{max} = 17.5L - 30.625 \quad L > 3.5 \text{ m}$$

$$V_{max} = 10L \quad L \leq 3.50 \text{ m}$$

$$V_{max} = 70 - \frac{122.50}{L} \quad L > 3.50 \text{ m}$$

روش گام به گام طراحی مقاطع T شکل از روش تنش مجاز (ACI) :



$$M_c = \frac{f_c}{2} \times h_f (d - 0.5h_f)$$

چنانچه مقدار لنگر طرح (M) کوچکتر از M_c باشد فقط فولاد کششی نیاز داریم که مقدار اولیه آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$A_s = \frac{M}{f_s(d - 0.5h_f)}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

$$\rho n, \quad a = \frac{h_f}{d}, \quad q = \frac{1}{2\rho n}, \quad n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{135}{\sqrt{f'_c}}$$

$$k = \frac{\rho n + 0.5a^2}{\rho n + a}$$

$$J = \frac{6 - 6(a) + 2(a)^2 + a^3 \times q}{6 - 3a}$$

$$A_s = \frac{M}{f_s J d}$$

$$f_c = \frac{M}{(1 - \frac{h_f}{2kd})bh_f J d}$$

 f_s : تنش مجاز کششی فولاد f_c : تنش مجاز فشاری بتن

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \phi = 0.9$$

$$M_c = 0.85f'_c b h_f \left(d - \frac{h_f}{2}\right)$$

فقط فولاد کششی نیاز است $M_n < M_c \rightarrow$

$$A_s = \frac{M_n}{f_y(d - 0.5h_f)}$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85f'_c b_w}$$

$$A_{sf} = \frac{0.85f'_c(b - b_w)h_f}{f_y}$$

$$M_c = 0.85(0.6f'_c) b h_f (d - 0.5h_f)$$

$$A_s = \frac{M_u}{0.85f_y(d - 0.5h_f)}$$

$$a = \frac{A_s(0.85f_y)}{0.85(0.6f'_c)b}$$

$a < h_f = t \rightarrow$ شکل T

$a > h_f = t \rightarrow$ مستطیل شکل

$$A_{sf} = \frac{0.85(0.6f'_c)(b - b_w)h_f}{0.85f_y}$$

$$A_{s \min} \begin{cases} f_y < 4200 \\ f_y = 4200 \\ f_y > 4200 \end{cases} \text{ دال پل}$$

$$V = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{V_c}{b_w d} \text{ تنش برشی مقاوم اسمی مقطع}$$

$$V_c = 0.25\sqrt{f'_c} \text{ تنش مجاز}$$

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} \text{ آشتو برای مقاومت نهایی}$$

$$V_c = 0.38\sqrt{f'_c} \text{ آبا برای مقاومت نهایی}$$

$$M_{nf} = A_{sf} f_y (d - 0.5h_f)$$

$$M_{nw} = M_n - M_{nf}$$

$$m = \frac{f_y}{0.85f'_c}$$

$$A_{sw} = \frac{b_w d}{m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2.35 \times M_{nw}}{f'_c b d^2}} \right]$$

$$A_s = A_{sf} + A_{sw}$$

آیین نامه آبا برای مقاطع T شکل برای محاسبه میلگردهای خمشی:

$$M_{uf} = A_{sf} (0.85f_y) (d - 0.5h_f)$$

$$M_{uw} = M_u - M_{uf}$$

$$m = \frac{0.85f_y}{0.85(0.6f'_c)}$$

$$A_{sw} = \frac{b_w d}{m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{3.92M_u}{f'_c b d^2}} \right]$$

$$A_s = A_{sf} + A_{sw}$$

$$A_{s \min} \leq \begin{cases} \frac{14}{f_y} b_w d \\ 1.33 (A_s \text{ محاسباتی}) \end{cases} \text{ در تیرها}$$

$$A_{s \min} = 0.002 bh$$

$$A_{s \min} = 0.0018 bh$$

$$A_{s \min} = (0.0018 \times 4200 / f_y) bh$$

مقاومت عضو بتن:

تنش مجاز

$$V_s = \frac{A_v f_s d}{S} \leq V_c = \begin{cases} 0.25\sqrt{f'_c} \\ 0.38\sqrt{f'_c} \\ 0.53\sqrt{f'_c} \end{cases}$$

گام خاموت

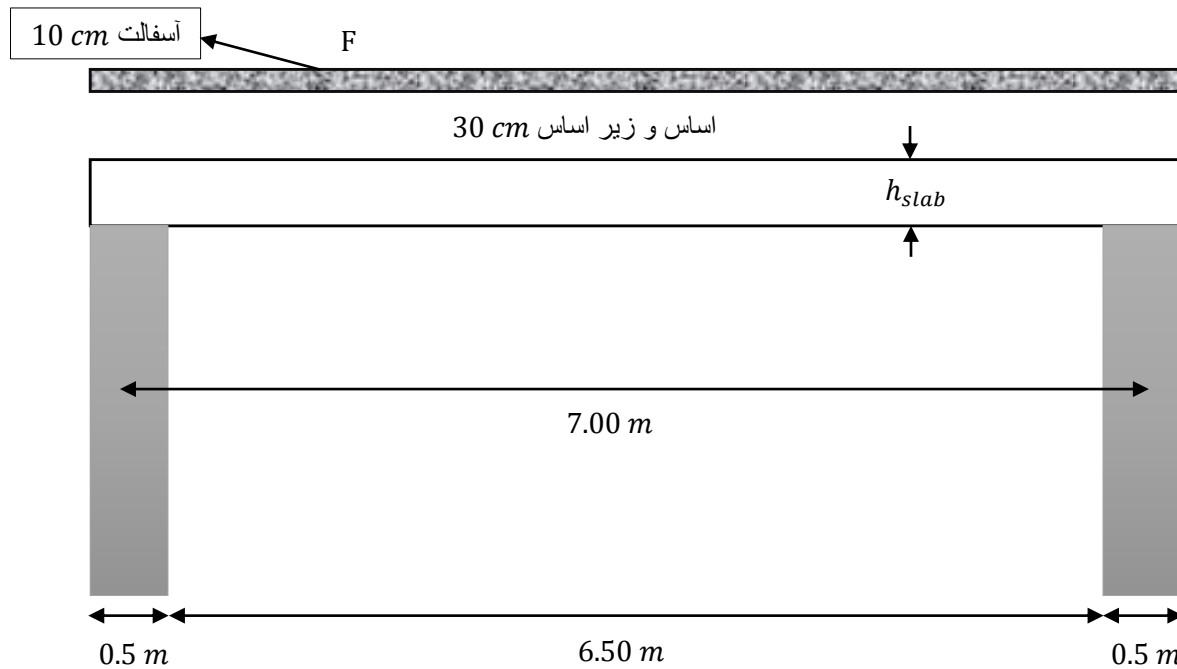
$$A_v = 2 \times \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow \text{قطر میلگرد بر حسب cm}$$

روش گام به گام طراحی میلگردهای برشی:

$$\begin{array}{ll}
 \text{گام 1} \left\{ \begin{array}{l} V = \frac{V}{b_w d} \\ V_n = \frac{V_u}{0.85} \\ V_n = \frac{V_n}{b_w d} \\ V_u = \frac{V_u}{b_w d} \end{array} \right. & \begin{array}{l} \text{روش تنش مجاز} \\ \text{آشتو} \\ \text{آب مقاومت نهایی} \end{array} \\
 \text{گام 2} \left\{ \begin{array}{l} V_c = 0.25 \sqrt{f'_c} \\ V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} \\ V_c = 0.38 \sqrt{f'_c} \end{array} \right. & \\
 \text{گام 3} \left\{ \begin{array}{l} V_n \text{ or } V_u \text{ or } V > V_c \\ \left(\frac{A_v}{S} \right)_{\min} = \frac{3.5 b_w}{f_y} \end{array} \right. &
 \end{array}$$

مثال: عرشه یک عنصری متشکل از دال بتن آرمه مطابق شکل، مفروض است:

دهانه آزاد 6.5 m ، عرض تکیه گاه 0.5 m به عرض آزاد برای عبور دو خط رفت و برگشت 7.30 m + دو شانه 1.85 m در چپ و راست، بارگذاری طبق آیین نامه 139، نوع میلگرد آجدار (\emptyset)، $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$ ، نوع بتن $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$



$$f_c = 0.4 f'_c = 0.4 \times 250 = 100 \text{ kg/cm}^2$$

$$V_s = 0.25 \sqrt{f'_c} = 3.95 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_s = 0.55 f_y = 2200 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{دهانه محاسباتی} \left\{ \begin{array}{l} 6.5 + h_{slab} \\ 6.5 + (0.25 + 0.25) = 7.00 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$h_{slab} = \frac{1}{15} \text{ (فاصله مرکز به مرکز طوطی و دال)}$$

$$h_{slab} = \frac{1}{15} \times 7 = 0.46 \text{ m}$$

$$h_{slab} = 0.55 \text{ m} \text{ انتخاب شد}$$

$$h_{slab} = 1.1 (L + 3) / 30 \text{ توصیه آشتو}$$

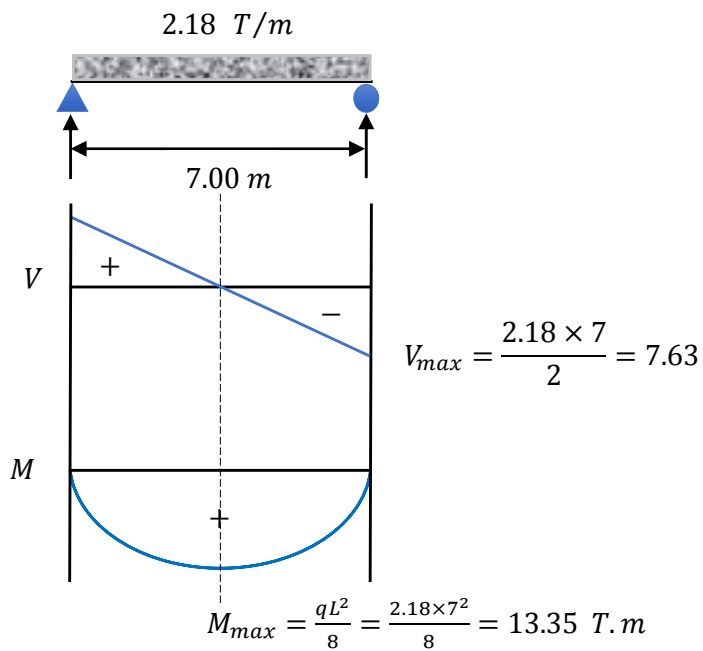
$$h_{slab} = 1.1 (7 + 3) / 30 = 0.37 \text{ m} < 0.55 \text{ m} \quad \checkmark$$

$$\text{وزن بتن} = 0.55 \times 2.5 = 1.38 \quad \gamma_c$$

$$\text{متوسط ضخامت لایه آسفالت روی دال} = 0.10 \times 2.2 = 0.22 \quad \gamma_A$$

$$30 \text{ m} \text{ ضخامت لایه اساس و زیر اساس} = 0.3 \times 1.92 = 0.58 \quad \gamma_{soil}$$

$$\sum \text{وزن} = 2.18 \text{ T/m}$$



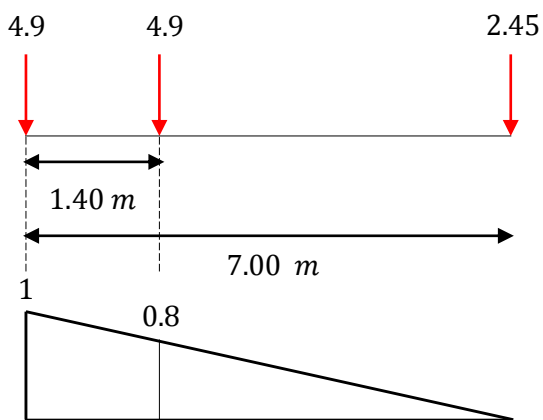
عرض موثر $E = 1.22 + 0.06L \leq 2.1 \text{ m}$

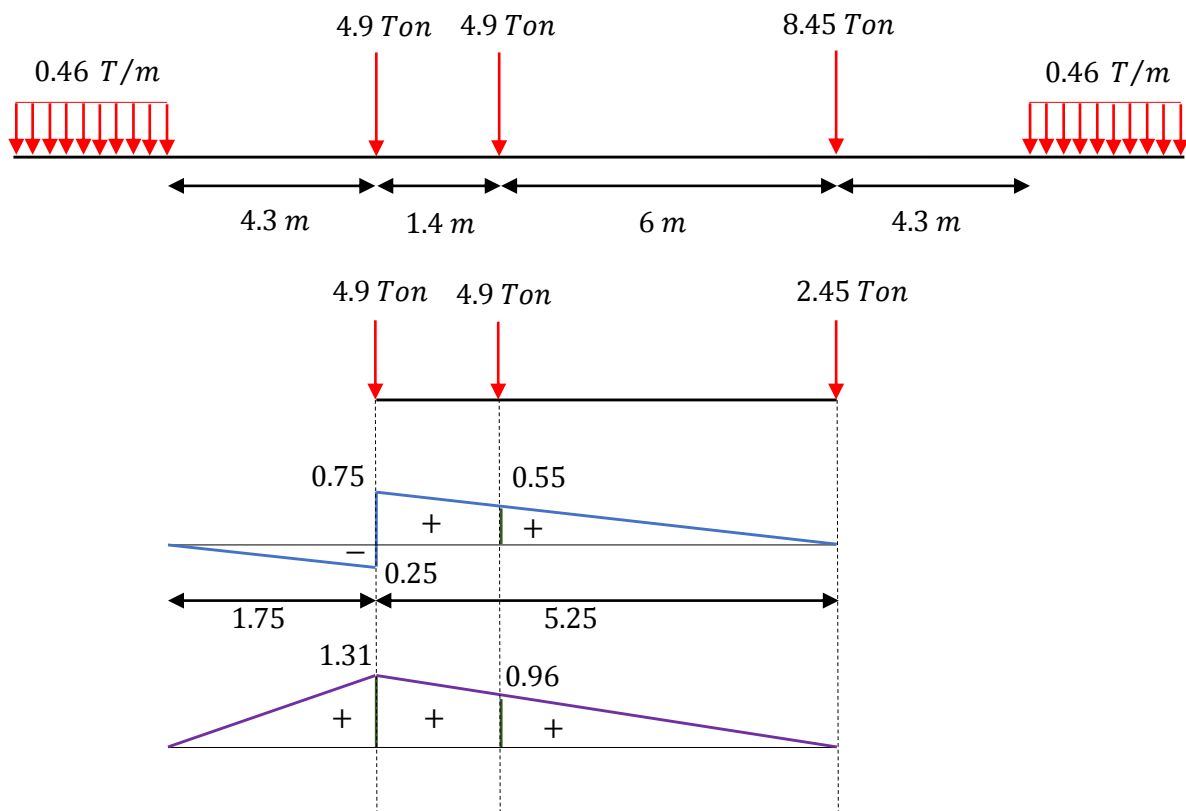
عرض موثر $= 1.22 + 0.06 \times 7.00 = 1.64 \text{ m}$ ✓

کسری از بار عقب چرخ کامیون بر پهنای یک متر دال $= \frac{8}{E} = \frac{8}{1.64} = 4.9 \text{ ton}$

کسر بار یکنواخت $= \frac{1.5}{2E} = \frac{1.5}{2 \times 1.64} = 0.46 \text{ T/m}$

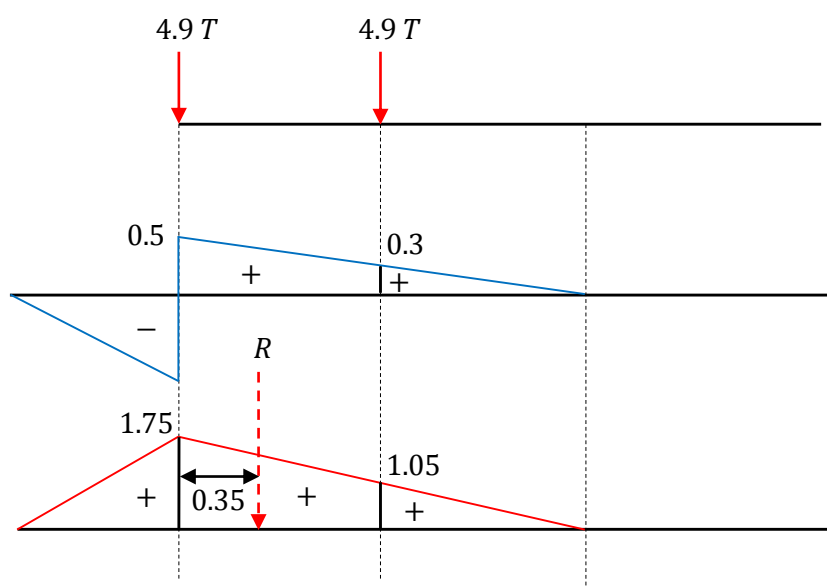
در تکیه گاه $\begin{cases} M = 0 \\ V = 4.9 \times (1 + 0.8) = 8.82 \text{ ton} \end{cases}$





$$V\left(at + \frac{L}{4}\right) = 4.9(0.75 + 0.55) = 6.73 \text{ Ton}$$

$$M\left(at + \frac{L}{4}\right) = 4.9(1.31 + 0.96) = 11.12 \text{ Ton}$$



$$V \left(at + \frac{L}{2} \right) = 4.9(0.5 + 0.3) = 3.92 \text{ Ton}$$

$$M \left(at + \frac{L}{2} \right) = \frac{4.9(2.45 + 3.85)}{7} \times 3.15$$

$$M_{max} = 13.89 \text{ Ton}$$

$$\delta = 1.3 - 0.005 L - 0.15 h$$

$$\delta = 1.3 - 0.005 \times 7 - 0.15 \times 0.4 = 1.21$$

$$I = 1.21 - 1 = 0.21$$

محل	V_D	V_L	V_I	$V_{(D+L+I)}$	M_D	M_L	M_I	$M_{(D+L+I)}$
تکیه گاه	7.63	8.82	1.85	18.3	0	0	0	0
$\frac{1}{4}L$	3.82	6.37	1.34	11.53	10.01	11.12	2.34	23.47
$\frac{1}{2}L$	0	3.92	0.82	4.74	13.35	13.89	2.92	30.16

$$f_s = 2200 \text{ kg/cm}^2, \quad f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_v = 3.95 \text{ kg/cm}^2, \quad n = \frac{135}{\sqrt{250}} \approx 9$$

$$d = 55 - (4 + 1.6 + 1.2) = 48 \text{ cm}$$

$$d = 7 \text{ mm} \rightarrow (\text{کاور} + \text{نصف ضخامت میلگردها, براساس فرض})$$

$$V = 16.07 \text{ Ton} \rightarrow \text{مقدار برش در روی منحنی خط تاثیر برش ماکزیمم در تکیه گاه}$$

$$V = \frac{16.07 \times 1000}{100 \times 48} = 3.35 \text{ kg/cm}^2 < 3.95 \text{ kg/cm}^2 = 0.4\sqrt{f'_c}$$

عمق موثر دال

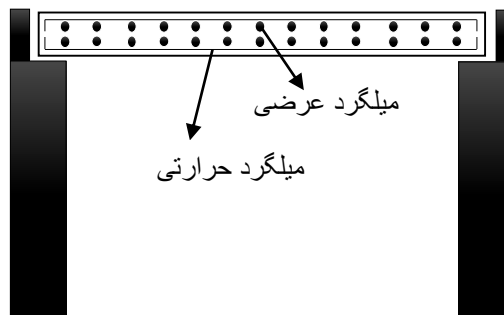
$$\frac{ql^2}{8} \text{ بارمرده}$$

طراحی برای خمش:

$$M_{max} = 30.16 \text{ T.m}$$

$$r = \frac{f_s}{f_c} = \frac{2200}{100} = 22$$

$$k = \frac{n}{n + r} = \frac{9}{9 + 22} = 0.29$$



$$J = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.29}{3} = 0.903$$

$$M_c = \frac{1}{2} f_c k J b d^2 \quad , \quad b = 100 \text{ cm} \rightarrow \text{یک متر طول دال}$$

$$M_c = 30.17 \text{ T.m} > 30.16 \text{ T.m} \rightarrow \text{میلگرد فشاری در دال نیاز نیست}$$

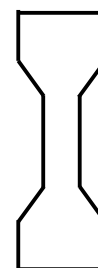
$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s J d} = \frac{30.16 \times 10^5}{2200 \times 0.903 \times 48} = 31.63 \text{ cm}^2$$

$$\text{درصد میلگردهای عرضی دال} = \frac{55}{\sqrt{s}} = \frac{55}{\sqrt{7}} = 21\% < 50\%$$

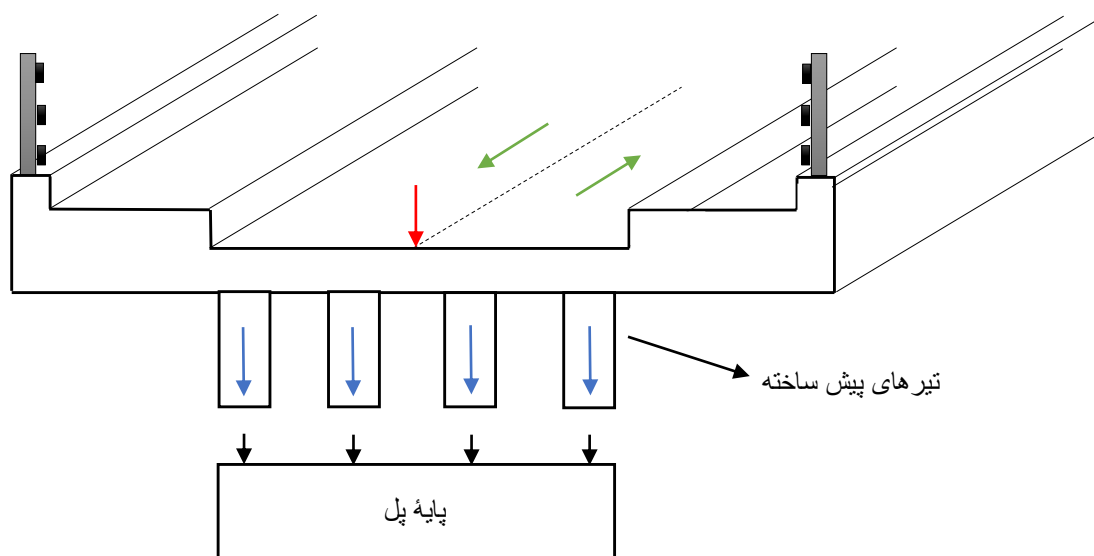
$$\text{سطح مقطع میلگردهای عرضی} = 0.21 \times 32.64 = 6.85 \text{ cm}^2$$

$$\text{سطح مقطع میلگردهای حرارتی} = 0.0015 \text{ تا } 0.0025 \text{ bd}$$

$$\text{سطح مقطع میلگردهای حرارتی} = 0.002 \times 100 \times 48 = 9.6$$



تیر پیش ساخته



تیرهای پیش ساخته

پایه پل