

اصول مهندسی پل



www.mirjalili.net

فصل سوم

بارهای وارد بر پل

مدرس: دکتر محمد رضا میر جلیلی

دانشگاه نیرد - نیم سال اول ۹۶-۹۵

(توضیح: مطالب این جزوه در حد اختصار بوده و توضیحات تکمیلی در کلاس درس ارائه خواهد شد)



مقدمه

آیین نامه های بارگذاری پل:

۱. آیین نامه بارگذاری پل ها - نشریه ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
۲. آیین نامه طرح پل های راه و راه آهن در برابر زلزله - نشریه ۴۶۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
۳. آیین نامه طراحی پل آمریکا (آشتو)، AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7th, Edition (2014)

بارهای وارد بر پل

بارهای وارد بر پل عبارتند از:

بارهای غیردائمی	بارهای دائمی
FR = نیروی اصطکاک	DC = وزن مرده اجزای سازه
TU = تغییر دمای یکنواخت	DW = وزن مرده سطوح روکش (آسفالت)
CR = اثر خزش	EH = فشار افقی خاک
SH = انقباض	EV = فشار قائم خاک ناشی از وزن آن
TG = گرادیان حرارتی	ES = بار سربار خاک
SE = نشست	DD = نیروی کشانی رو به پایین (down drag)
EQ = نیروی زلزله	WA = فشار جریان آب
IC = بار یخ	WS = بار باد روی سازه
CT = نیروی برخورد وسایل نقلیه	WL = بار باد روی وسیله نقلیه
CV = نیروی برخورد کشتی	

توضیح:

علائم به کار رفته در جدول فوق و در ادامه توضیحات بر اساس معیار آیین نامه آشتو بوده و نامگذاری بارهای آیین نامه های ایران در این جزوه با آیین نامه آشتو همسازی شده است.

در ادامه تعدادی از بارهای متعارف در پلهای کشورمان طبق نشریه ۱۳۹ توضیح داده شده است.

۱- بارهای مرده (DC, DW)

در پل های راه بار مرده شامل وزن اجزای سازه ای پل (DC) و وزن اجزای غیر سازه ای پل (DW) شامل روکش آسفالتی، عایق کاری، جان پناه، لوله، کابل یا سایر تاسیسات شهری عبوری از پل، سیستم های روشنایی، علائم راه، تابلوهای تبلیغاتی و وزن خاک روی عرشه در پل های زیرخاکی می باشد.

۲- بارهای زنده (LL, IM, PL, LS)

۲-۱ انواع بار زنده (LL)

مطابق نشریه ۱۳۹ در پل های راه این بارها شامل موارد زیر است:



۱. بار نوع اول (بار عادی)

این بار معرف اثر محورهای سنگین کامیون ها و بار یکنواخت ناشی از وسایل نقلیه معمولی می باشد.

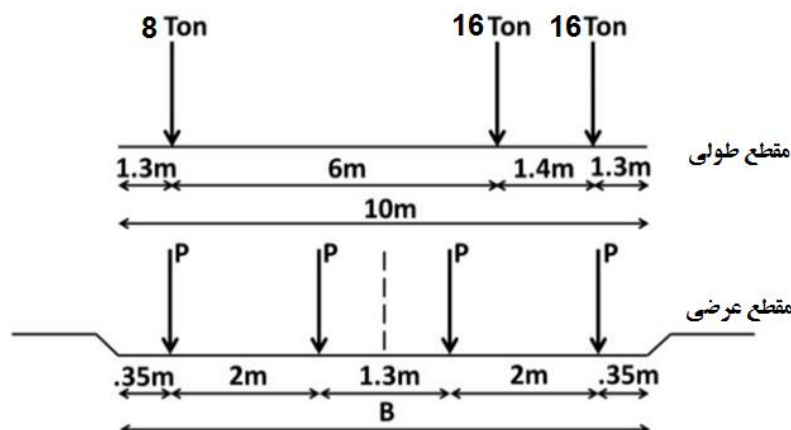
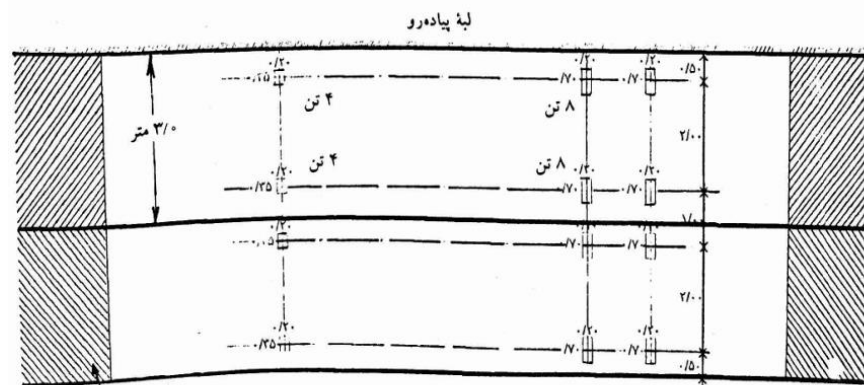
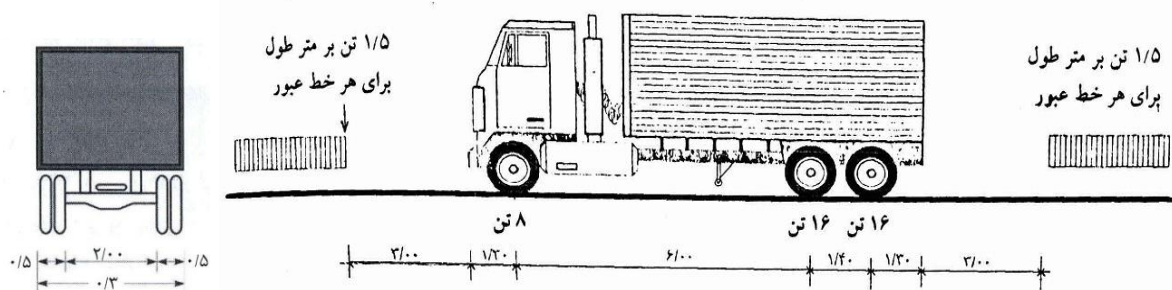
۲. بار نوع دوم (بار منفرد)

یک بار منفرد ۸۰ کیلو نیوتن روی یک سطح ۳۰×۳۰ سانتی متری در بحرانی ترین موقعیت

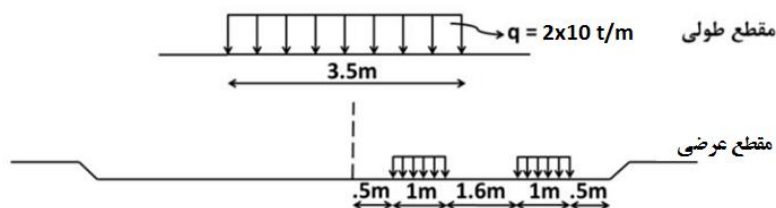
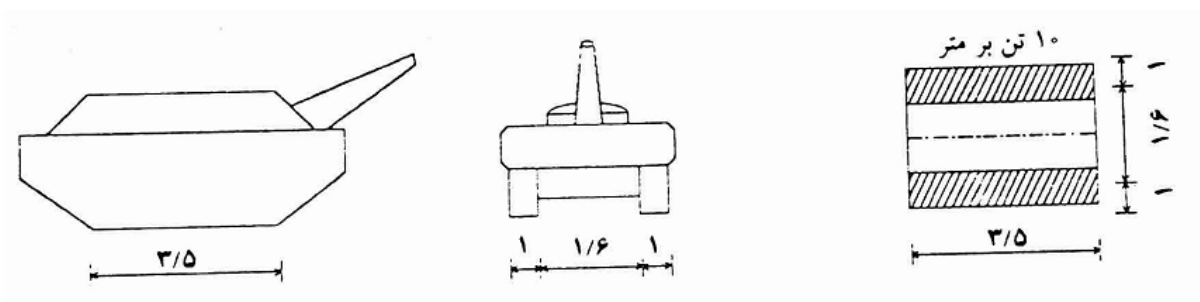
۳. بار نوع سوم (بار نظامی)

الف- بار تانک ۷۰۰ کیلونیوتن

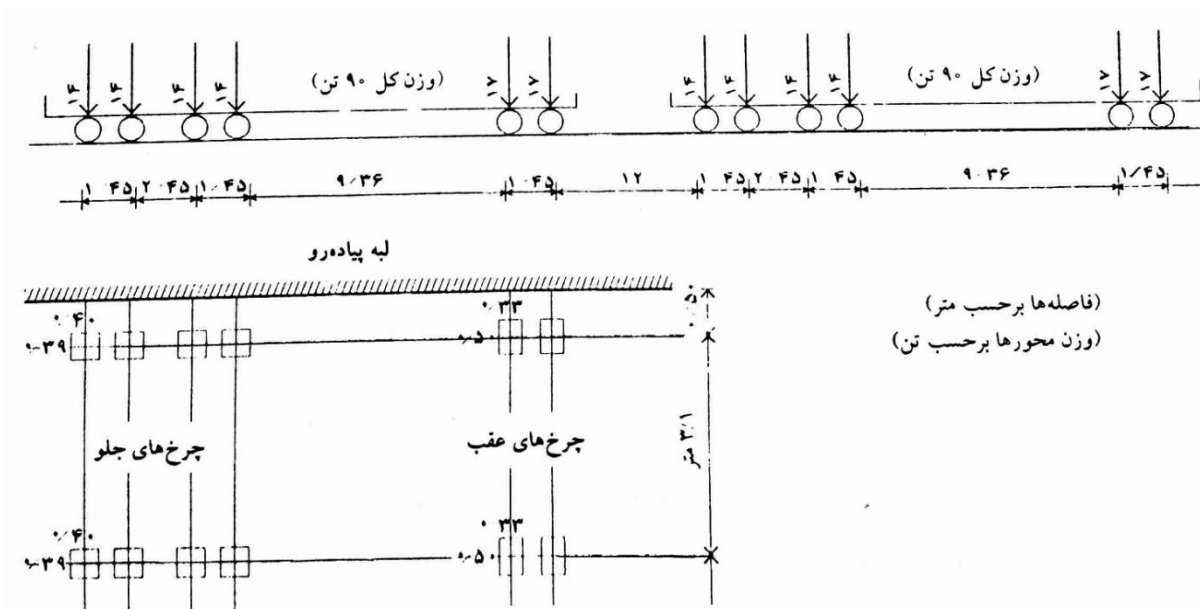
ب- بار تریلی تانک بر ۹۰۰ کیلونیوتن (بوژی)



شکل ۱- بار نوع اول (بار عادی)، کامیون ۴۰ تنی به همراه بار یکنواخت ناشی از وسایل نقلیه معمولی



شکل ۲- بار نوع سوم-الف، تانک نظامی ۷۰ تنی



شکل ۳- بار نوع سوم-ب، تریلی تانک بر ۹۰ تنی

نکته ۱: بار عادی در امتداد عرضی پل، به تعداد خطوط عبور اعمال می گردد.

نکته ۲: از آنجایی که عبور همزمان بیش از یک تانک بر روی یک پل ممنوع می باشد، در امتداد عرضی پل تنها باید بار

مربوط به یک تانک منظور گردد. در امتداد طولی فاصله تانکها از یکدیگر ۳۰ متر می باشد.

نکته سوم: بار تریلی تانک بر در امتداد عرضی پل تنها یک بار منظور شده و در امتداد طولی حداکثر دو تریلی با فاصله

حداقل ۱۲ متر در نظر گرفته شود.



۲-۲- اثر همزمانی بارهای زنده عادی (بار کامیون)

گفته شد که بار عادی در امتداد عرضی پل، به تعداد خطوط عبور اعمال می گردد. در پل های عریض دارای چند مسیر عبور، مطابق نشریه ۱۳۹ باید یک ضریب کاهش مربوط به احتمال همزمانی اشغال تمام مسیرهای عبور مطابق جدول زیر به بارهای بهره برداری اعمال گردد.

جدول ضریب کاهش برای منظور کردن اثر همزمانی بارهای زنده عادی

تعداد خطوط عبور	ضریب کاهش
۱ یا ۲	۱
۳	۰٫۹
۴	۰٫۷۵

تعداد خط های عبور معادل عدد صحیح خارج قسمت عرض سواره رو پل به عرض خط عبور محاسباتی است. عرض استاندارد هر خط عبور محاسباتی ۳ متر در نظر گرفته می شود.

۳-۲- اثر ضربه دینامیکی بارهای زنده عادی (IM)

مطابق نشریه ۱۳۹، ضریب ضربه از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\delta = 1.3 - 0.005L - 0.015h$$

در این رابطه h ارتفاع خاکریز روی پل بر حسب متر است.

مقدار L بر حسب متر برای حالت های مختلف به ترتیب زیر تعیین می شود:

- در پل های ساده، L طول دهانه است.

- در پل های یکسره یا پیوسته، در محاسبه لنگر خمشی مثبت هر دهانه، L طول همان دهانه

در محاسبه لنگرهای خمشی تکیه گاهی L مقدار متوسط طول های دو دهانه مجاور تکیه گاه مورد نظر

- در مورد تیرهای عرضی و دال ها، L طول دهانه مربوط است.

- در محاسبه اجزای طره ای، L طول طره است.

نکته ۱: ضریب ضربه باید در محاسبه تمامی اعضای عرشه پل منظور شود.

نکته ۲: دیوارهای حایل، کوله ها و پی ها از این قاعده مستثنی هستند.

نکته ۳: ضریب ضربه برای بارهای زنده نوع دوم و سوم برابر ۱ منظور می شود.



۲-۴- بار زنده پیاده رو (PL)

در صورتی که بار عادی روی سطح سواره‌رو قرارداده شود، مقدار بار اعمال شده روی هر پیاده‌رو معادل ۲ کیلونیوتن بر متر مربع است.

در محاسبه اجزای ثانوی عرشه پل، غیر از تیرهای باربر و اصلی، باید باری معادل ۴ کیلونیوتن بر مترمربع در سطح هر پیاده‌رو اعمال شود.



بار پیاده‌رو

در شرایط در شرایط استثنایی باید اثر یکی از چرخ‌های کامیون استاندارد یا ۴۰ کیلونیوتن بار در سطحی به ابعاد ۳۵*۲۰ سانتیمتر در نامناسب‌ترین موقعیت بر سطح پیاده‌رو اعمال گردد. اثر این بار با بارهای قبلی ترکیب نمی‌شود.



بار متمرکز پیاده‌روی پل

۲-۵- بار زنده پل عابر پیاده

در خصوص پل‌های عابر پیاده باید مقدار زیر را به عنوان بار بهره‌برداری در نظر گرفت:

$$p = 2 + \frac{150}{L + 150}$$

که در رابطه فوق:

L: طول بارگذاری شده بر حسب m

P: بار محاسباتی پیاده‌رو بر حسب KN/m² است.

۳- نیروی ترمز (BR)

مطابق نشریه ۱۳۹، این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید، اما لازم نیست از ۴۰۰ کیلونیوتن بزرگتر منظور شود.

$$F_r = 200 + 7L_0 \leq 400 \text{ kN}$$

که در رابطه فوق:

L₀: فاصله درز انبساط تا درز انبساط بعدی بر حسب m

F_f: نیروی ترمز بر حسب KN است.

نکته: این نیرو فقط در یک مسیر عبور اعمال می‌شود.



۴- نیروی گریز از مرکز (CE)

این نیرو در پل‌های خمیده در پلان اعمال می‌گردد. مقدار آن برابر است با:

$$F_c = \frac{V^2}{Rg} W$$

که در این رابطه:

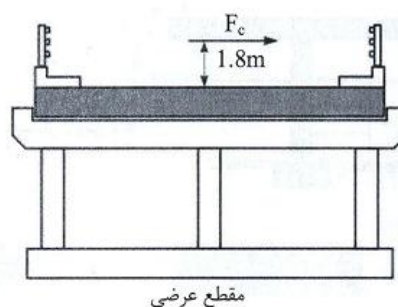
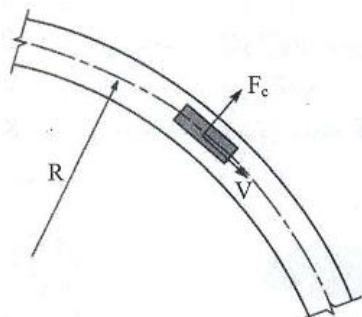
V : سرعت طراحی راه بر حسب m/s

R : شعاع قوس محور راه بر حسب m

W : وزن کامیون استاندارد بر حسب kN

g : شتاب ثقل بر حسب m/s^2

نکته: نیروی گریز از مرکز در ارتفاع ۱٫۸ متری تراز روی عرشه و به صورت افقی و در جهت عرض عرشه اعمال می‌شود.



۵- بار باد (WS, WL)

در حالت کلی اثر باد به عواملی چون موقعیت جغرافیایی، ارتفاع منطقه از سطح دریا، وضعیت توپوگرافی محل و

مشخصات هندسی پل بستگی دارد.

بار باد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = P \times A$$

که در این رابطه:

P : فشار باد

A : سطح بادگیر

۵-۱- فشار باد

در شرایط متعارف برای تخمین فشار باد بر پل‌ها می‌توان فرض‌های ساده کننده زیر را در نظر گرفت:

- شدت باد روی سطح بادگیر بدون بار ترافیک (WS) معادل ۲٫۵ کیلونیوتن بر متر مربع

شدت باد روی سطح بادگیر با بار ترافیک (WL) معادل ۱٫۲۵ کیلونیوتن بر مترمربع

- بار باد در دو امتداد طولی و عرضی بطور جداگانه اثر می‌کند و ترکیب اثر دو امتداد لازم نیست.



۵-۲- سطح بادگیر

۱- سطح بادگیر عرشه پل و وسایل نقلیه برای بار وارد در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آنها در امتداد محور طولی پل است.

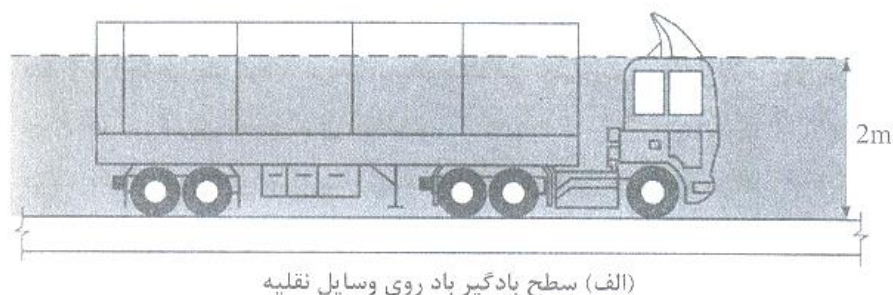
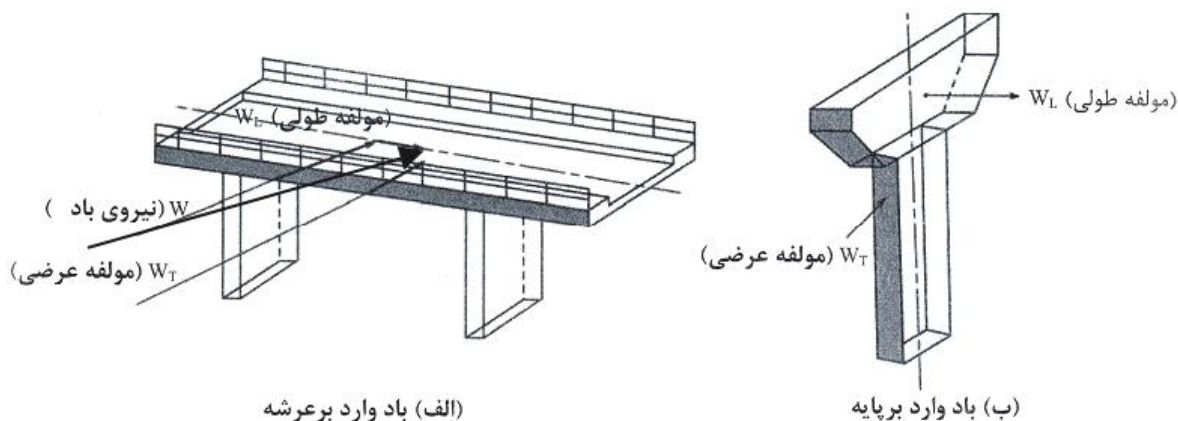
۲- سطح بادگیر عرشه پل و وسایل نقلیه برای بار وارد در امتداد طولی، نصف مقدار سطح بادگیر فوق در نظر گرفته می شود.

۳- در مورد پل های با عرشه متشکل از تیر مشبک، مساحت واقعی محاسبه شده برای تیر مشبک، در ضریب ۱٫۵ ضرب می شود.

۴- در صورتی که جان پناه روی سطح پل اجرا شود، سطح بادگیر آن مشابه سطح عرشه و در صورت تعبیه نرده، سطح بادگیر مشابه تیرهای مشبک محاسبه می شود.

۵- ارتفاع سطح بادگیر وسایل نقلیه از روی سطح سواره رو به میزان ۲ متر در سراسر طول پل منظور می شود.

۶- سطح بادگیر پایه ها در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آنها در امتداد محور طولی پل و در امتداد طولی بزرگترین سطح نمای قائم پایه (سطح واقعی پایه) در نظر گرفته می شود.





۶- نیروی زلزله (EQ)

۶-۱- کلیات

- ۱- پل ها باید در دو امتداد عمود بر هم قادر به تحمل نیروهای افقی ناشی از زلزله باشند و در هر یک از این دو امتداد بایستی نیروهای جانبی را به نحوی مناسب به شالوده ها انتقال دهند.
- ۲- این دو امتداد معمولا محور طولی پل و محور عمود بر آن انتخاب می شوند.
- ۳- در مورد پل هایی که در پلان قوسی شکل اند، یکی از محورها را می توان راستای خطی که کوله ها را به هم متصل می کند، در نظر گرفت.
- ۴- در محاسبات فقط مولفه افقی نیروی زلزله در نظر گرفته می شود و از اثر مولفه قائم صرف نظر می گردد.
- ۵- در محاسبه اثر مولفه افقی نیروی زلزله در هر امتداد، ۳۰٪ اثر نیروی زلزله در امتداد عمود بر آن بطور همزمان بایستی اعمال گردد.

- ۶- نیروی زلزله باید در هر یک از امتدادهای پل به صورت رفت و برگشت در نظر گرفته شود.
- ۷- پایه های پل علاوه بر نیروی زلزله ناشی از وزن عرشه، باید نیروی زلزله ناشی از وزن خود را نیز تحمل کنند.

۶-۲- گروه بندی پل ها از نظر اهمیت

الف- پل های با اهمیت زیاد

- پل های آزادراهها، بزرگراهها، راههای اصلی و فرعی درجه یک و پل های شبکه اصلی و فرعی راه آهن کشور
- پل های راههای اتصالی به صنایع حیاتی کشور و تاسیسات مهم نظامی
- ب- پل های با اهمیت متوسط
- این گروه شامل سایر پل ها، از قبیل پل های راههای فرعی درجه دو و درجه سه (روستایی) می باشد.

۶-۳- گروه بندی پل ها از نظر نظم سازه ای

الف- پل های منظم

۱. تعداد دهانه ها ۶ و یا کمتر باشد.
۲. زاویه قوس پل در پلان مساوی و یا کمتر از ۹۰ درجه باشد.
۳. در پل های متشکل از دهانه های ساده متوالی، زاویه قوس پل در پلان مساوی یا کمتر از ۲۰ درجه باشد.
۴. نسبت طول دهانه های متوالی کمتر از ۲ باشد.
۵. نسبت سختی پایه های متوالی میانی کمتر از ۳ باشد.

ب- پل های نامنظم

- این گروه شامل سایر پل ها می باشد.



۴-۶- درصد مشارکت بار زنده

- ۱ - در پل‌های شهری: اعم از راه و راه آهن، حداقل نصف بار زنده عادی منظور می‌شود.
- ۲ - در سایر پلها: در صورتی که مقدار بار زنده کمتر از نصف بار مرده عرشه باشد، بار زنده منظور نمی‌گردد.
- ۳ - در غیر این صورت، دو سوم مجموع بار مرده و زنده عرشه در محاسبات منظور می‌شود.

۵-۶- روش های تحلیل

- ۴ محاسبه پل‌ها در برابر نیروی زلزله، با یکی از دو روش زیر انجام می‌گیرد:
- ۵ الف: روش تحلیل استاتیکی معادل
- ۶ ب: روش تحلیل دینامیکی
- ۷ در پل‌های منظم که طول کل پل کمتر از ۳۰۰ متر و دارای دهانه‌های با طول کمتر از ۱۰۰ متر و پایه‌های با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر باشند، می‌توانند با استفاده از روش تحلیل استاتیکی معادل محاسبه شوند. در غیر این صورت این پل‌ها باید به روش دینامیکی تحلیل شوند.
- ۸ - در پل‌های از نوع معلق، ترکیه‌ای، باسکولی و کلیه پل‌های نامنظم تحلیل دینامیکی اجباری است.
- ۹ در ادامه تحلیل استاتیکی معادل توضیح داده می‌شود.

۶-۶- نیروی جانبی زلزله

- ۱۰ نیروی جانبی زلزله موثر بر عرشه پل در هر یک از دو امتداد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F = \frac{ABI}{R} W$$

که در آن:

- ۱۱ W: وزن موثر لرزه‌ای پل (شامل بار مرده و درصدی از بار زنده)
- ۱۲ A: ضریب شتاب مبنای طرح
- ۱۳ B: ضریب بازتاب پل که از طیف بازتاب طرح استاندارد یا طیف ویژه ساختگاه تعیین می‌گردد.
- ۱۴ I: ضریب اهمیت پل که برای پلهای مهم برابر با ۱,۲ و برای پلهای با اهمیت متوسط برابر با ۱ است.
- ۱۵ R: ضریب رفتار

۱-۶-۶- ضریب اهمیت پل I

گروه پل	ضریب اهمیت پل (I)
گروه با اهمیت زیاد	۱,۲
گروه با اهمیت متوسط	۱,۰



۶-۶-۲- شتاب مبنای طرح A

شتاب مبنای طرح (A) در مناطق مختلف کشور به شرح زیر تعیین می شود:

مقدار شتاب مبنای طرح (A)	خطر نسبی پهنه	منطقه
۰,۳۵	خیلی زیاد	۱
۰,۳۰	زیاد	۲
۰,۲۵	متوسط	۳
۰,۲۰	کم	۴

۶-۶-۳- ضریب بازتاب پل B

چنانچه مبنای محاسبه، نشریه ۴۶۳ باشد، باید از طیف طرح ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ استفاده کرد. با توجه به اینکه نشریه فوق، به روز نبوده، به نظر لازم است از طیف ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ جهت محاسبه ضریب بازتاب استفاده شود.

محاسبه ضریب بازتاب بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰

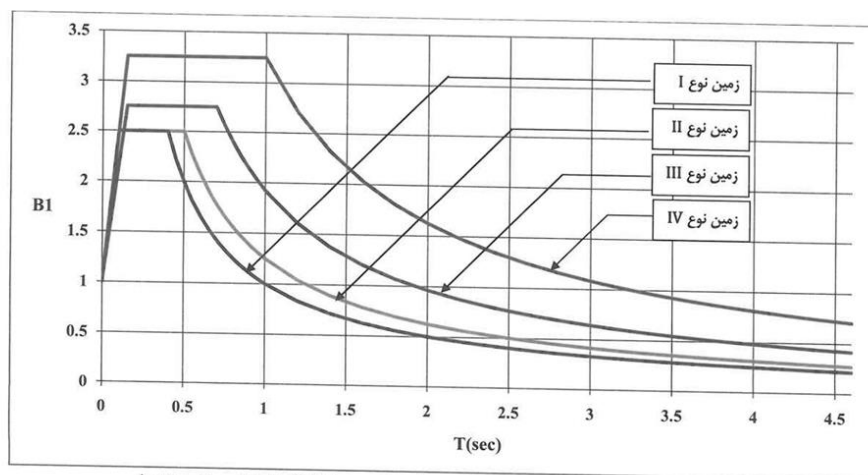
$$B = B_1 N$$

$$B_1 = S_o + (S - S_o + 1)(T/T_o) \quad o < T < T_o$$

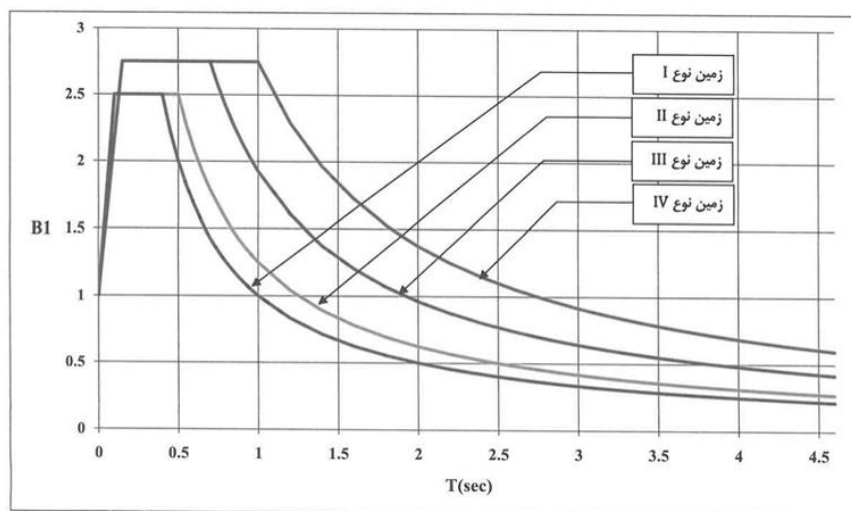
$$B_1 = S + 1 \quad T_o < T < T_s$$

$$B_1 = (S + 1)(T_s/T) \quad T > T_s$$

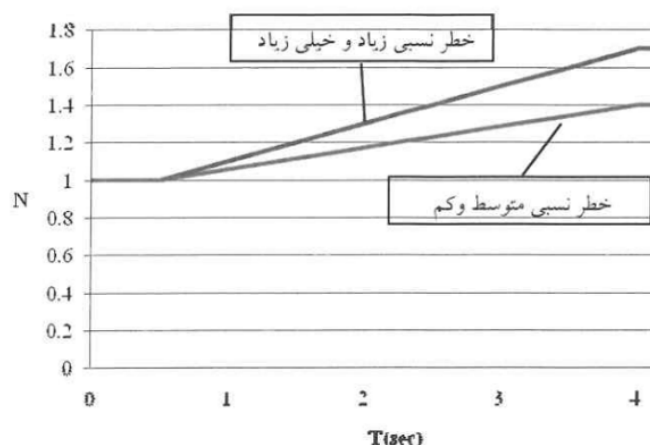
خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد		خطر نسبی کم و متوسط		Ts	To	نوع زمین
So	S	So	S			
1	1.5	1	1.5	0.4	0.1	I
1	1.5	1	1.5	0.5	0.1	II
1.1	1.75	1.1	1.75	0.7	0.1	III
1.1	1.75	1.3	2.25	1.0	0.15	IV



شکل ۱-۳- الف- ضریب شکل طیف طرح برای انواع زمین های مندرج در بند (۲-۴) با خطر نسبی کم و متوسط



شکل ۱-۲ - ب- ضریب شکل طیف طرح برای انواع زمین‌های مندرج در بند (۴-۲) با خطر زیاد و خیلی زیاد



شکل ۲-۲ - ضریب اصلاح طیف، N، خاک نوع II

۴-۶-۶- زمان تناوب اصلی نوسان پل

- زمان تناوب اصلی نوسان پل (T) را می‌توان از رابطه زیر بر اساس روش بار یکنواخت و یا رابطه مشابه در روش توزیع بر اساس مد اصلی ارتعاش محاسبه نمود.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{Kg}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

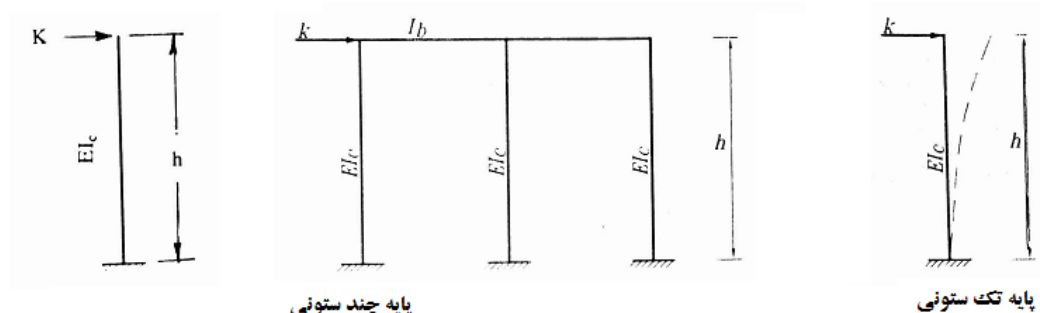
در این رابطه:

K: سختی جانبی پل در جهت مورد نظر است و از تقسیم نیروی جانبی فرضی وارده به عرشه پل به تغییر مکان حداکثر که در عرشه پل ایجاد می‌گردد، به دست می‌آید.

M: جرم موثر لرزه‌ای پل

g: شتاب ثقل

مقدار K برای حالت‌های مختلف به صورت زیر به دست می‌آید:



زلزله در امتداد طولی

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

پایه چند ستونی

زلزله در امتداد عرضی

$$I_b = 0 \rightarrow K = \sum_{i=1}^n \frac{3EI_c}{h^3} \quad I_b = \infty \rightarrow K = \sum_{i=1}^n \frac{12EI_c}{h^3}$$

پایه تک ستونی

$$K = \frac{3EI_c}{h^3}$$

به صورت کلی می توان از تحلیل سازه نامعین (به روش دستی یا رایانه ای) برای تخمین سختی قاب استفاده نمود. برای این کار باید یک تغییر مکان واحد به بالای قاب اعمال نمود و برش پایه را حساب کرد که این برش پایه معرف سختی قاب خواهد بود.

۶-۵-۶- ضریب رفتار پل

ضریب رفتار (R) که عواملی از قبیل شکل پذیری، سیستم سازه ای پل، درجه نامعینی و اضافه مقاومت موجود در پایه های پل را مشخص می کند و بر حسب آنکه پایه ها از نوع چه سیستم سازه ای ساخته شوند، تعیین می گردد.

زیرسازه ^۱	R	اتصالات ^۴	R
پایه های دیواری ^۲	۲	اتصال روسازه به کوله	۰/۸
قاب چند ستونی	۵	درز انبساط واقع در دهانه	۰/۸
تک ستونها	۳	رو سازه	
شمع ستون بتن آرمه (قاب هایی که ستونهای آنها را شمع تشکیل می دهد)		اتصال ستونها، پایه ها یا قاب شمعها به تیر سرستون، تیر سرشمع (Cap Beam) یا روسازه	۱/۰
(a) فقط شمعهای قائم	۳		۱/۰
(b) دارای حداقل یک شمع مایل	۲	اتصال ستونها یا پایه ها به شالوده	
قاب شمعهای فولادی یا مرکب (فولاد و بتن آرمه)			
(c) فقط شمعهای قائم	۵		
(d) دارای حداقل یک شمع مایل	۳		
شالوده ها، سرشمعها و شمعها ^۳			
		نصف مقدار R که در محاسبه پایه ها به کار برده شده است	

۱: ضریب R بدست آمده باید در هر دو جهت عمود بر هم به زیرسازه اعمال گردد.

۲: پایه دیواری را می توان در جهت ضعیف بصورت ستون، طراحی نمود مشروط بر اینکه کلیه ضوابط مربوط به طراحی ستونها مانند دورپیچ، زاویه خم و ... رعایت شده باشند. در چنین شرایطی می توان از ضریب R برای تک ستون در جهت ضعیف استفاده کرد.

۳: قسمتهایی از شمعها که بالای تراز آب یا خاک می باشند، پایه تلقی شده و سایر قسمتهای زیر آن شالوده، سرشمع و شمع تلقی می گردند.

۴: اتصالات به سیستمهای مکانیکی اطلاق می شود که نیروهای برشی و محوری را از یک عضو به عضو دیگر سازه منتقل می کند. این وسیله عموماً شامل اتصالات خمشی نمی شود و بنابراین فقط سیستم تکیه گاهی و برش گیرها را شامل می شود.



۷- فشار جانبی خاک (EH)

۷-۱- فشار جانبی خاک در حالت استاتیک

در صورت داشتن مشخصات خاک می توان از روابط زیر فشار جانبی خاک در عمق h را محاسبه نمود.

$$q_a = K_a \gamma h \quad \text{فشار خاک در حالت محرک}$$

$$q_0 = K_0 \gamma h \quad \text{فشار خاک در حالت سکون}$$

$$q_p = K_p \gamma h \quad \text{فشار خاک در حالت مقاوم}$$

تعیین این موضوع که خاک در وضعیت محرک قرار داد یا مقاوم بستگی به سختی جانبی کوله و میزان تغییر مکان جانبی آن دارد. برای اینکه فشار خاک به صورت محرک در نظر گرفته شود

کوله باید آزاد بوده و بتواند به مقدار کافی تغییر مکان دهد، به طوریکه مقاومت خاک کاملاً بسیج شده یا به عبارت دیگر فشار محرک خاک K_a تامین شود. خاک پشت کوله بدون چسبندگی و با زاویه اصطکاک داخلی Φ می باشد. حدود مقادیر دوران دیوار که باعث بسیج شدن فشار محرک و مقاوم خاک می شود در جدول ذیل آمده است:

نوع خاک	دوران دیوار $\left(\frac{\Delta}{H}\right)$	
	فشار محرک	فشار مقاوم
دانه ای متراکم	۰.۰۰۱	۰.۰۲۰
دانه ای غیرمتراکم	۰.۰۰۴	۰.۰۶۰

برای درک اولیه از بار طراحی جانبی خاک در حالت محرک به صورت تقریبی می توان از مقادیر زیر استفاده نمود.

بار طراحی جانبی خاک ^{۱)}	طبقه بندی	شرح مصالح انباشته شده
(kN/m ² به ازای هر متر عمق) یکنواخت خاک		
^[۲] ۵/۵	GW	شن تمیز خوب دانه بندی شده؛ مخلوط شن و ماسه
^[۲] ۵/۵	GP	شن تمیز بد دانه بندی شده؛ مخلوط شن و ماسه
^[۲] ۵/۵	GM	شن لای دار؛ مخلوط شن و ماسه بد دانه بندی شده
^[۲] ۷/۰۷	GC	شن رس دار؛ مخلوط شن و رس بد دانه بندی شده
^[۲] ۵/۵	SW	ماسه تمیز خوب دانه بندی شده؛ مخلوط شن به همراه ماسه
^[۲] ۵/۵	SP	ماسه تمیز بد دانه بندی شده؛ مخلوط شن و ماسه
^[۲] ۷/۰۷	SM	ماسه لای دار؛ مخلوط ماسه و لای بد دانه بندی شده
^[۲] ۱۳/۳۵	SM-SC	مخلوط ماسه و لای با ریزدانه های پلاستیک
^[۲] ۱۳/۳۵	SC	ماسه لای دار و رس دار؛ مخلوط ماسه و رس بد دانه بندی شده
^[۲] ۱۳/۳۵	ML	لای و لای رس دار غیر آلی
^[۲] ۱۳/۳۵	ML-CL	مخلوط غیر آلی لای و رس
۱۵/۷۱	CL	رس های غیر آلی با پلاستیسیته کم تا متوسط
^[۲]	OL	لای ها و لای های رس دار آلی؛ خاک های آلی با پلاستیسیته کم
^[۲]	MH	لای با پلاستیسیته بالا، رس های کثیف
^[۲]	CH	رس های غیر آلی با پلاستیسیته کم
^[۲]	OH	رس های آلی و رس های لای دار



۲-۷- فشار جانبی خاک در هنگام زلزله

این نیرو بر کوله های آزاد که مانعی برای تغییر مکان جانبی آنها وجود ندارد، تاثیر گذار است.

روش ساده و کاربردی برای تخمین اولیه اضافه فشار محرک خاک در هنگام زلزله در کوله های آزاد می توان استفاده

نمود، عبارت است از محاسبه اضافه فشار فعال خاک در حین زلزله که برابر است با:

$$\Delta_{pae} = 1.25 AK_a \gamma H$$

اضافه فشار فعال خاک در ارتفاع کوله یا دیوار به این ترتیب توزیع می شود:

الف- در کوله ها و دیوارهای طره ای که راس آنها می تواند تغییر مکان جانبی داشته باشد، این فشار به صورت مثلی که

قاعده آن در راس دیوار قرار دارد توزیع می گردد.

ب- در کوله ها و دیوارهایی که راس آنها تغییر مکان جانبی ندارد، توزیع فشار به صورت یکنواخت صورت می پذیرد.

پ- برای حالات بینابینی الف و ب، توزیع فشار به صورت نمودار دوزنقه ای که مشخصات آن با قضاوت مهندس طراح

تعیین می شود صورت می گیرد.

لازم به ذکر است که این روش یک روش تخمینی و قدیمی می باشد و برای محاسبات دقیق باید روش زیر به کار رود.

در مورد کوله ها و دیوارهای حایل که مانع مهمی در برابر تغییر مکان افقی آنها وجود ندارد، روش شبه استاتیک مونونوبه

اوکابه برای تعیین فشار جانبی محرک خاک در حین زلزله را می توان بکار برد.

ضریب فشار محرک خاک K_{AE} و نیروی محرک خاک E_{AE} در حالت زلزله به روش مونونوبه اوکابه بوسیله فرمول های زیر

تعیین می شود.

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\Psi \cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta)} \quad E_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) k_{AE}$$

k_h : ضریب شتاب افقی زلزله

γ : وزن مخصوص خاک

k_v : ضریب شتاب قائم زلزله

H : ارتفاع دیوار

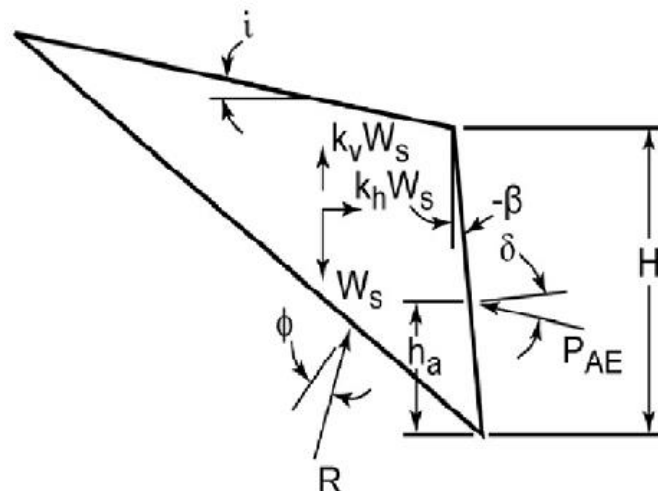
i : زاویه شیب خاکریزی

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی

β : زاویه شیب سطح پشت دیوار (زاویه دیوار در سطح تماس با خاک)

δ : زاویه اصطکاک بین خاک و کوله

A شتاب مبنای زلزله طرح است. می توان از اثرات زلزله قائم صرف نظر نمود ($k_v=0$)



$$\Psi = \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)} \right]^2$$

$$\theta = \text{Arctan} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right)$$

$$k_h = 0.5 A$$



۸- نیروی ناشی از جریان آب (WA)

نیروی حاصل از جریان آب روی پایه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_f = P.A$$

که P فشار ناشی از جریان آب روی پایه‌ها و A تصویر سطح مقطع پایه عمود بر جریان آب می‌باشد.

فشار ناشی از جریان آب روی پایه‌ها توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = 512 KV^2$$

در رابطه فوق P فشار بر حسب پاسکال و V سرعت بر حسب متر بر ثانیه است. K ضریب ثابت مربوط به شکل پایه هاست

که برای پایه‌های مستطیلی 1.375 و برای پایه‌های زاویه‌دار 0.5 و برای پایه‌های دایره‌ای 0.67 در نظر گرفته می‌شود.

۹- نیروی ناشی از تغییر یکنواخت دما و اختلاف دما (TU, TG)

۹-۱- تغییر یکنواخت دما (TU)

اثر تغییر یکنواخت دما باید در محاسبه تمامی اجزای باربر پل مورد توجه قرار گیرد. این تغییرات برای پل‌های سطحی که

خاکریزی روی آنها صورت نمی‌گیرد، معادل ۳۵ درجه سانتیگراد و برای پل‌های زیرخاکی کم عمق (با ارتفاع خاکریزی ۳

متر یا کمتر) معادل ۲۰ درجه سانتیگراد منظور می‌شود.

۹-۲- گرادیان حرارتی (TG)

اثرات اختلاف دما بین سطوح فوقانی و تحتانی عرشه پل با این فرض که تغییر دما در ضخامت مقطع خطی است، در

محاسبات وارد می‌شود. این اختلاف تابع اوضاع فصلی است که خود به یکی از دو حالت زیر ظاهر می‌شود:

حالت ۱- تابش خورشید روی سطح فوقانی و سایه در سطح تحتانی عرشه پل

حالت ۲- یخبندان روی سطح فوقانی عرشه پل

مقدار اختلاف دما با توجه به شرایط یاد شده و نوع پل از جدول زیر به دست می‌آید.

جدول اختلاف دما در سطوح فوقانی و تحتانی عرشه پل‌ها به درجه سانتیگراد

مرکب	یتنی	فلزی	نوع پل / اوضاع فصلی
			حالت ۱
۱۰	۷	۱۰	حالت ۱
۷	۳,۵	۵	حالت ۲

۱۰- سایر بارها

۱۰-۱- نیروی برخورد وسایل نقلیه (CT)

پایه‌هایی از پل‌های سواره‌رو که در کناره راه واقع می‌شوند باید برای جلوگیری از برخورد وسایل نقلیه، به وسیله دیواره یا

جان‌پناه محافظت شوند. چنانچه این‌گونه محافظت‌ها به عمل نیاید باید روی پایه پل، در امتداد موازی محور راه زیر پل،



نیرویی افقی معادل ۸۰۰ کیلونیوتن و در امتداد عمود بر محور راه زیر پل، نیرویی افقی معادل ۳۰۰ کیلونیوتن در نظر گرفت. هر یک از دو نیروی فوق به تنهایی و در ارتفاع یک متری از سطح راه بر پایه اثر می‌کند.

۱۰-۲- اثر جمع شدگی (SH) و خزش بتن (CR)

اثر جمع شدگی و خزش بتن باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد. برای منظور کردن این اثر باید به آیین‌نامه‌های معتبر بتن آرمه و بتن پیش‌تنیده مراجعه شود.

۱۰-۳- اثر نشست یا کوتاه شدن پایه‌ها (SE)

چنانچه نشست یا کوتاه‌شدگی نامساوی بین دو یا چند پایه پل محتمل باشد باید اثر آن در طراحی پل منظور شود.



۱۱- همزمانی بارها

- گروه بندی همزمانی بارهای مختلف طبق نشریه ۱۳۹ به شرح زیر است:
- گروه یک:** مجموعه‌ای از بارها شامل بار مرده، اثر جریان آب، اثر کاهش وزن ناشی از غوطه‌وری، تغییر شکل‌های تابع زمان مصالح (جمع‌شدگی و خزش)، نشست پایه‌ها و فشار خاک.
- گروه دو:** شامل گروه یک + بارهای زنده همراه با اثر ضربه، اثر ترمز و گریز از مرکز
- گروه سه (الف):** شامل گروه یک + اثر باد وارد بر سازه
- گروه سه (ب):** شامل گروه دو + اثر باد وارد بر سازه و ترافیک
- گروه چهار (الف):** شامل گروه یک + اثر تغییر دما
- گروه چهار (ب):** شامل گروه دو + اثر تغییر دما
- گروه پنج:** شامل گروه یک + اثر زمین لرزه
- گروه شش:** شامل گروه یک + بارهای ویژه

۱۲- ترکیبات بارگذاری

۱۲-۱- روش تنش مجاز

- برای کنترل تنش‌های خاک زیر فونداسیون و مواردی از طراحی که روش تنش مجاز کاربرد دارد، می‌توان از ترکیبات بارگذاری زیر استفاده نمود.

گروه	نوع بارها	ترکیب بار	ضریب افزایش تنش مجاز
۱	بارهای دایمی و جریان آب	DC+WA+DD+CR+SH+SE+EH+EV	۱
۲	بارهای دائمی و زنده	LL+IM +BR+CE + گروه ۱	۱
۳- الف	بارهای دائمی و باد بر سازه	WS + گروه ۱	۱,۳۳
۳- ب	بارهای دائمی، زنده و باد بر سازه و ترافیک	WS+WL + گروه ۲	۱,۳۳
۴- الف	بارهای دائمی و تغییر دما	TG+TU + گروه ۱	۱,۳۳
۴- ب	بارهای دائمی، زنده و تغییر دما	TG+TU + گروه ۲	۱,۳۳
۵	بارهای دائمی و زلزله	EQ + گروه ۱	۱,۳۳ برای بتن آرمه ۱,۵۰ برای فولادی
۶	بارهای دائمی و ویژه	بارهای ویژه + گروه ۱	طبق نیاز



۱۲-۲- روش حدی نهایی - آیین نامه بتن ایران و نشریه ۳۸۹

این روش در طراحی سازه های بتن آرمه طبق آیین نامه بتن ایران (آبا) و آیین نامه طراحی پلهای بتن آرمه (نشریه ۳۸۹) به کار می رود.

در این روش سه حالت حدی نهایی مقاومت، تغییر شکل ها و ترک خوردگی ها باید بررسی شوند.

۱۲-۲-۱- حالت حدی نهایی مقاومت

در این حالت حدی رابطه زیر برای اعضای مختلف سازه باید برآورده گردد:

$$S_u \leq S_r$$

که در این رابطه S_u تلاش نهایی یا نیروی داخلی نهایی وارد بر عضو و S_r مقاومت نهایی عضو می باشد.

- مقاومت نهایی عضو S_r بر اساس روابط مقاومت آیین نامه بتن ایران و با در نظر گیری ضرایب جزئی ایمنی مقاومت

$\phi_c = 0.6$ برای بتن و $\phi_s = 0.85$ برای فولاد به دست می آید.

- تلاش نهایی عضو S_u با در نظر گیری ضریب ایمنی بار $(\gamma_x = 1.25 \gamma_f)$ به دست می آید.

$$S_u = 1.25 \sum (\gamma_x \cdot X)$$

در این رابطه X نوع بار و γ_x ضریب جزئی مربوط به آن است که مقادیر آن در جدول زیر داده شده است. γ_f ضریب ایمنی بار نامیده می شود و یک ضریب افزایشی است.

هر ردیف در این جدول یک ترکیب بارگذاری محسوب می شود که باید در طراحی پل ها منظور گردد.

جدول ضرایب γ_x و ترکیبات بارها در حد نهایی مقاومت

شماره ترکیب	D	LL + IM	CE	E	DD	WA	WS	WL	FR	T,CR, SH, SE	EQ
۱	β_D	1.3	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0
۲	β_D	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0
۳	β_D	1	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0
۴	β_D	1	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0
۵	β_D	0	0	β_E	1	1	1	0	0	1	0
۶	β_D	1	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0
۷	β_D	0	0	β_E	1	1	0	0	0	0	1

برای آشنایی با انواع بارها و علائم متناظر با آنها به ابتدای فصل مراجعه گردد.



توضیحات:

۱- ضریب بار مرده β_D باید همواره برابر با یک در نظر گرفته شود مگر در ستون‌ها و پایه‌ها در مواردی که در ترکیب بار محوری و لنگر خمشی هدف بکارگیری بیشترین برون محوری باشد، که در این صورت β_D باید برابر با ۰,۷۵ منظور شود.

۲- ضریب فشار خاک در موارد مختلف β_E باید مطابق اعداد زیر در نظر گرفته شود.

الف- برای فشار جانبی فعال روی دیوارهای حائل و یا قاب‌ها، به استثنای پل‌های زیرخاکی ۱,۳

ب- برای فشار جانبی در حال سکون ۱,۱۵

پ- برای تعیین لنگر خمشی مثبت در تیرهای قاب‌ها ۰,۵

ت- برای اثر قائم فشار خاک ۱,۰

۱۲-۲-۲- حالت حدی بهره بردای (تغییر شکل ها و ترک خوردگی ها)

کنترل حالت حدی بهره برداری در دو حالت حدی تغییر شکل ها و ترک خوردگی ها بر اساس محدود بودن تغییرشکلهای ایجاد شده در سازه و یا میزان بازشدگی ترک خوردگی ها تحت اثر بارهای بهره برداری صورت می گیرد.

نکات:

۱- در کنترل بهره برداری ضرایب ایمنی بار γ_f برابر واحد منظور می گردد.

۲- در کنترل بهره برداری ضرایب جزئی ایمنی مقاومت ϕ_c و ϕ_s برابر واحد منظور می گردد.

۳- مقدار تغییرشکلهای ایجاد شده در قطعات و میزان بازشدگی ترک ها در فصلهای بعد ارائه خواهد شد.

۱۲-۳- روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) - آیین نامه AASHTO

این روش در طراحی سازه های بتنی و فولادی طبق آیین نامه های آمریکا مانند AASHTO, AISC, ACI کاربرد دارد.

مطابق آیین نامه AASHTO، طراحی سازه‌ای پل‌های بزرگراهی بر مبنای روش حالات حدی ضرایب بار و مقاومت

(LRFD) انجام می‌گیرد. رابطه اصلی طراحی عبارت است از:

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \Phi R_n$$

Q_i : اثر نیرو، R_n : مقاومت اسمی، γ_i : ضریب افزایش بار، Φ : ضریب کاهش مقاومت، η_i : ضریب اصلاح بار است.

۱۲-۳-۱- انواع حالات حدی مطابق با AASHTO

۱-۱۲-۳-۱- حالات حدی مقاومت

این حالات حدی برای تامین مقاومت کافی برای ارضای رابطه $\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \Phi R_n$ در برابر بارهایی است که انتظار می‌رود

پل در دوره عمر خود تجربه کند.



این حالات حدی شامل ارزیابی مقاومت برای خمش، برش، پیچش و نیروی محوری است.

ضرایب مقاومت کوچکتر از ۱ هستند و برای مصالح مختلف و حالات حدی گوناگون با هم متفاوتند.

۱-۳-۱۲-۲ حالات حدی اتفاق حدی

این حالات حدی برای تامین ایمنی سازه پل طی رخداد زلزله، سیل، برخورد وسیله نقلیه، کشتی و یخ وضع شده است.

$$R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

۱-۳-۱۲-۳ حالات حدی بهره برداری

این حالات حدی مربوط به محدودیت‌های تنش، تغییر شکل و عرض ترک اجزای پل است که در شرایط خدمت حاصل می‌شود.

در این حالت حدی، تمامی ضرایب مقاومت $\Phi = 1.0$ و $\gamma = 1.0$ است.

$$R_n \geq \sum Q_i$$

۱-۴-۱۲-۳ حالات حدی خستگی

این حالات حدی برای مجموعه‌ای از محدودیت‌های بازه تنش ایجاد شده توسط یک کامیون طراحی منفرد منظور می‌شود. این محدودیت‌ها بستگی به تعداد عبور بار در عمر طراحی پل دارد. این حالات حدی برای محدود ساختن رشد ترک ناشی از پدیده خستگی پر تواتر تحت بارهای تکرار شونده در اعضای فولادی و اتصالات آن و جلوگیری از شکست ناشی از آن وضع شده‌اند.

$$R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

۱۲-۳-۲ ضریب اصلاح بار، η

η_i ضریب اصلاح بار است که منظور کننده شکل‌پذیری، نامعینی و اهمیت عملکرد پل است.

این ضریب فقط در حالات حدی مقاومت اعمال می‌گردد.

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0.95$$

در بارهایی که بیشینه مقدار γ_i لازم است باید اعمال شود:

$$\eta_i = 1/\eta_D \eta_R \eta_I \leq 1.0$$

در بارهایی که کمینه مقدار γ_i لازم است اعمال گردد:

η_D ضریب شکل‌پذیری، η_R ضریب نامعینی، η_I ضریب اهمیت عملکردی پل است.

نام ضریب اصلاح بار	توضیحات
η_D ضریب شکل‌پذیری	برای اجزا و اتصالات ترد برای جزئیات متداول مبتنی بر ضوابط AASHTO
	$\eta_D \geq 1.05$ $\eta_D = 1$

$\eta_D = 0.95$	برای اجزا و اتصالاتی که دارای شکل پذیری فراتر از AASHTO هستند	1
$\eta_R \geq 1.05$	برای اجزای فاقد نامعینی نظیر تیر جعبه‌های تک و زیر سازه‌های تک ستون	2
$\eta_R = 1$	برای میزان نامعینی متداول	3
$\eta_R \geq 0.95$	برای سیستم‌های روسازه دال و تیر پیوسته و تیرهای با مقطع بسته مقاوم در برابر پیچش	4
$\eta_I \geq 1.05$	برای پل با اهمیت زیاد (پل ضروری یا حیاتی)	5
$\eta_I = 1$	برای پل با اهمیت متوسط	6
$\eta_I \geq 0.95$	برای پل با اهمیت کم	7

۱۲-۳-۳ ضرایب بار، γ

ضرایب بار بسته به نوع حالت حدی و نوع بارها در جدول زیر ارائه شده است.

ترکیبات بار	DC DD DW EH EV ES	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	Use one of these at a time			
										EQ	IC	CT	CV
مقاومت ۱	γ_p	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
مقاومت ۲	γ_p	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
مقاومت ۳	γ_p	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
مقاومت ۴	γ_p 1.5	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
مقاومت ۵	γ_p	1.35	1.00	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
اتفاق حدی ۱	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	--	-	-	1.00			
اتفاق حدی ۲	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
بهره‌برداری ۱	1.00	1.00	1.00	0.30	0.30	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
بهره‌برداری ۲	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-	-	-	-
بهره‌برداری ۳	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SF}	-	-	-	-
خستگی	-	0.75	--	-	-	--	-	-	-	-	-	-	

جدول زیر ساده شده جدول فوق بوده که برای پلهای کشور قابل کاربرد می باشد.

ترکیبات بار	DC DW EH EV ES	LL IM PL LS BR CE	WS	WL	FR	TU CR SH	EQ	توضیحات
-------------	----------------------------	----------------------------------	----	----	----	----------------	----	---------

حالات حدی	بارهای دائمی	بارهای زنده، ترمز، گریز از مرکز	بار باد بر سازه	بار باد بر ترافیک	نیروی اصطکاک	دما خزش جمع شدگی	زلزله	
مقاومت ۱	γ_p	1.75	-	-	1.00	0.50/1.20	-	ترکیب بار پایه ثقلی (جهت طراحی عرشه)
مقاومت ۳	γ_p	-	1.40	-	1.00	0.50/1.20	-	اثر باد روی سازه را در نظر می گیرد.
مقاومت ۴	γ_p	1.35	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	-	اثر باد را روی سازه و وسیله نقلیه در نظر می گیرد
اتفاق حدی ۱	γ_p	γ_{EQ}	-	-	1.00	--	1.00	اثر زلزله را منظور می کند.
بهره برداری ۱	1.00	1.00	0.30	0.30	1.00	1.00/1.20	-	برای طراحی بتن پیش تنیده و کنترل عرض ترک و تغییر شکل.
بهره برداری ۲	1.00	1.30	-	-	1.00	1.00/1.20	-	برای کنترل تسلیم و اتصالات در سازه های فولادی
بهره برداری ۳	1.00	0.80	-	-	1.00	1.00/1.20	-	برای کنترل ترک و تنش کششی در شامیرهای بتنی پیش تنیده
خستگی	-	0.75	--	-	1.00	1.00/1.20	-	پدیده خستگی

ضریب بار برای بارهای دائمی، γ_p ، در ترکیب بارها ثابت نبوده و حد پایین و بالا دارد که باید هر دو ضریب در ترکیب بارها اعمال گردد.

جدول ضریب بار برای بارهای دائمی (γ_p)

نوع بار	ضریب بار	
	حداکثر	حداقل
DC: وزن مرده اجزای سازه	۱,۲۵	۰,۹۰
DW: وزن مرده آسفالت	۱,۵۰	۰,۶۵
EH: فشار افقی خاک فعال	۱,۵۰	۰,۹۰
مقاوم	۱,۳۵	۰,۹۰
EV: فشار قائم خاک		
پایداری کلی-	۱,۳۵	-
سازه های حایل خاک-	۱,۳۵	۱
سازه های مدفون صلب-	۱,۳	۰,۹۰
قاب های صلب-	۱,۵	۰,۹۰
سازه های مدفون انعطاف پذیر-	۱,۹۵	۰,۹۰
کالورت های فولادی انعطاف پذیر-	۱,۵	۰,۹۰
ES: سربار خاک	۱,۵	۰,۷۵