**ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل ها به روش کمی و مبانی نظری آنها**

**- مقدمه**

روش هاي متنوعي براي ارزيابي آسيب پذيري سازه ها پيشنهاد شده اند كه در اين فصل به
دسته بندي و بررسي تعدادي از اين روش ها پرداخته مي شود. همچنين امروزه به علت
هزينه هاي قابل توجه اجراي سازه ها و به منظور درك عميق تر رفتار آنها تحت بارهاي مختلف و پيچيده نظير زلزله، مدل سازي سازه اي به صورت تجربي (فيزيكي) يا رياضي از جايگاه ويژه اي برخوردار است مدل سازي به چند صورت قابل انجام است ساخت مدل آزمايشگاهي با ابعاد كوچكتر از ابعاد واقعي، مدل واقعي و به كار گيري مدل تحليلي. از اين رو مدل سازي تحليلي به كمك كامپيوتر معمولاً به دو روش نخست ترجيح داده مي شود. برخی از حالات طراحی و آسیب پذیری سازه در ادامه ارائه شده است.

**- حالات حدي طراحي و ارزيابي سازه**

به طور كلي حالات حدي مختلفي را مي توان در طراحي سازه ها ي جديد يا ارزيابي آسيب پذيري و مقاوم سازي سازه هاي موجود مبنا قرار داد اين حالات را مي توان براي اعضا يا براي كل سازه در نظر گرفت در اين قسمت به تشريح انواع حالات حدي و توصيف و ويژگي هاي آنها با تاكيد بر ارزيابي لرزه اي پل ها پرداخته شده است [14] و [15] و [29].

**- حالات حدي اعضا**

معمولاً براي طراحي سازه دو حالت حدي مطرح است. حالت حدي اول حالت حدي تسليم نخستين نام دارد در اين حالت تغيير ناگهاني سختي در آستانه تسليم در دورترين نقطه مقطع عضو رخ مي دهد. اين حالت حدي جهت تعريف سختي سيستم هاي شكل پذير در تحليل هاي ارتجاعي خطي با استفاده از منحني هاي هيسترزيس ساده مانند ارتجاعي– خميري كامل يا دو خطي به كار مي رود، حالت حدي دوم حالت حدي نهايي ناميده مي شود كه تعريف آن سليقه اي است مثلاً برخي اين حالت را متناظر با وقوع يك پديده فيزيكي بحراني نظير گسيختگي در ناحيه محتمل لولاي خميري در نظر مي گيرند كه در آن افت ناگهاني مقاومت و سختي نیز ديده مي شود [14].

**- حالات حدي سازه**

**- حالات حدي بهره برداري**

همانطور كه از نام اين حالت پيداست حالتي است كه تجاوز از آن در خدمت پذيري سازه خلل ايجاد مي كند. مثلاً براي مقاصد طرح يا ارزيابي لرزه اي، زمين لرزه هايي كه احتمال وقوع آنها زياد است نبايد به قابليت بهره برداري پل ها لطمه اي وارد سازند يعني پس از حادثه و عمليات تعمير پل باعث محدود ساختن تردد نگردد. احتمال وقوع زلزله متناظر با اين حالت حدي تابع اهميت حفظ قابليت عملكرد يك پل است. براي پل هاي كم اهميت اين حالت را مي توان متناظر با زلزلهاي دانست كه احتمال وقوع آن در 50 سال است. براي اهداف ارزيابي لرزه اي، بررسي اين حالت حدي چندان رايج نيست اما توصيه شده است كه براي ارزشيابي سازه هاي موجود مقدار كرنش اعضاي فولاد به 005/0 و اعضاي بتني به 001/0 محدود گردد [14].

**-حالات حدي آسيب پذيري**

تحت زلزله طراحي كه احتمال وقوع آن كمتر از زلزله نظير حالت قابليت بهره برداري است، سطح مشخصي از خرابي پذيرفتني است و معمولا اين سطوح توسط آيين نامه هاي طرح لرزه اي تعيين مي شود. مثلا ناحيه مفصل خميري نبايد نياز به تعويض داشته باشد. معمولاً در پل هاي طرح شده مطابق با ضوابط نظري و اجرايي آيين نامه ها چنين حالتي متناظر با ايجاد ضريب شكل پذيري جابجايي در محدوده 6 الي 3 مي باشد [14].

**- حالت حدي بقا**

هميشه لازم است فراتر از حالت حدي كنترل خرابي يك ظرفيت ذخيره در اعضاي باربر سازه موجود باشد تا پل در اثر بزرگترين زلزله ممكن ساختگاه فرو نريزد همانطور كه مشخص است هدف از مطرح ساختن اين نوع خرابي جلوگيري از تلفات جاني مي باشد و لذا در اين حالت حدي، خرابي هاي بسيار بيشتري نسبت به دو حالت اول حتي به نحوي كه سازه غير قابل تعمير و جايگزيني باشد پذيرفتني است. آستانه اين حالت آن است كه سازه ديگر توان حمل بارهاي ثقلي را نداشته باشد و فروريزش سازه هنگامي كه ظرفيت باقي مانده از ظرفيت لازم براي تحمل بارهاي ثقلي موجود كمتر شود يا اثرات پي- دلتا پايداري سازه را بر هم زند روی می دهد [14] و [15].

**- ارزيابي آسيب پذيري لرزه اي**

ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل هاي موجود در واقع یک نوع پیش بینی خسارت دیدگی آنها در مقابل زلزله های احتمالی است. زلزله های گذشته نشان دادند که پل ها از آسیب پذیرترین
مؤلفه های سیستم حمل و نقل می باشند، خرابی سیستم های حمل و نقل ناشی از زلزله های گذشته، بر ارزیابی خطرپذیری سیستم های حمل و نقل موجود تأکید می کنند. ارزیابی
آسیب پذیری لرزه ای به صورت تابعی از خطر سایت و مشخصه های سازه ای پل تعریف می شود. به طور کلی آسیب پذیری به صورت تابعی از رسیدن به سطح خرابی در یک شدت حرکت مشخص تعریف می شود و می توان آن را به صورت ماتریس های خرابی احتمالي[[1]](#footnote-1)، گرافی بین نسبت خرابی میانگین و شدت حرکت زمین و یا به صورت منحنی شکنندگی ارائه کرد. از این رو آنالیز شکنندگی یکی از اجزای ارزیابی آسیب پذیری می باشد [30].

در ادبیات فني تعاریف مختلفی از آسیب پذیری سازه ای ارائه شده است. که در ادامه بعضی از این تعاریف ارائه می گردد:

* یائو[[2]](#footnote-2) [31] معتقد است که آسیب پذیری یک سازه (خاک - پی - سازه) در برابر زلزله مبتنی بر قابلیت اعتماد سازه است و به این صورت بیان می شود، که سازه هنگامی آسیب پذیر است که تقاضای زمین لرزه از ظرفیت مربوطه در مرحله ی بحرانی که منتهی به عملکرد غیر قابل قبول برای سازه شود بیشتر گردد.
* آگراوال و همكارانش[[3]](#footnote-3) [32] این گونه عقیده دارند، كه سازه زماني آسيب پذير است كه وقوع يك خرابي نسبتاً كوچك موجب ايجاد خرابي هاي بزرگ ناشي از آن شود. سازه اي كه حتي در يك مورد آسيب پذير باشد، ديگر يك سازه مقاوم تلقي نمي شود.
* ليند[[4]](#footnote-4) [33] معتقد است كه آسيب پذيري نسبت احتمال شكست سيستم آسيب ديده به احتمال سيستم آسيب نديده مي باشد.

**- روش هاي ارزيابي آسيب پذيري**

به منظور زيان هاي وارده ناشي از يك زمين لرزه، لازم است براي هر نوع سازه رابطه بين شدت حركات زمين و ميزان آسيب وارده به سازه ها تعيين شود. رابطه ي اخير تابع آسيب پذيري خوانده مي شود روش هاي مختلفي براي ارزيابي خرابي ايجاد شده در سازه بر اثر زلزله موجودند. به طور كلي همه اين روش ها را مي توان در گروه هاي زير طبقه بندي كرد [30] و [34]:

-1 روش هاي طبقه بندي: دسته بندي سازه ها به كلاس هاي گونه شناسي

-2 روش هاي بازرسي و امتياز دهي: نسبت دادن مقادير عددي (امتياز) به هر يك از اجزاء مهم سازه

-3 روش هاي تحليلي: مقاومت مورد انتظار سازه در برابر حركات زمين

 -4روش هاي آزمايشگاهي: انجام آزمايش به منظور تعيين ويژگي هاي سازه يا اجزاي آن.

در روش هاي تحليلي ارزيابي آسيب پذيري سعي مي شود رابطه اي بين آسيب وارده به يك سازه مشخص و پارامترهاي كليدي و مهم پاسخ برقرار شود. به روش اول و دوم تحليل تجربي آسيب پذيري نيز گفته مي شود. در ادامه هر يك از اين روش ها مختصري توضيح داده شده اند.

**- روش هاي طبقه بندي**

اين روش ها كاملاً بر پايه مشاهدات آماري خرابي هاي ناشي از زلزله هاي گذشته قرار دارند و معمولاً براي انواع مختلف سازه ها، توابع آسيب پذيري حاصل از اين روش ها، رابطه اي بين درصد خرابي و يكي از معيارهاي شدت حركت زمين در حين زلزله، شتاب، سرعت يا جابجايي حداكثر زمين يا طيف پاسخ را بيان مي كنند. ذكر اين نكته لازم است كه اين روابط تجربي تنها براي يك سازه متوسط در دسته سازه هاي مورد مطالعه كاربرد دارند و پاسخ شان به شدت مشخصي از حركت زمين تخمين زده مي شود. بنابراين اين روابط نمي توانند براي يك سازه خاص اعمال شوند.

مراحل به دست آوردن توابع آسيب پذيري در اين دسته از روش ها، شامل سه گام اساسي زير مي باشد:

1- بازرسي و برآورد خسارات ناشي از زلزله هاي گذشته به وسيله پردازش آماري داده هاي مربوط به انواع متداول سازه ها، كيفيت ساخت و ساز، شرايط خاك و شرايط محلي و سطوح خرابي شناسايي شده.

2- تعيين پارامتر شدت ميانگين لرزش زمين در منطقه مورد مطالعه براي زلزله هايي كه تهيه داده هاي آسيب سازه اي و نيز پردازش آماري اين داده ها براي زلزله هاي مذكور در گام قبلي صورت گرفته است.

3- تركيب داده هاي آسيب سازه اي و شدت زمين لرزه متناظر با آنها به منظور توليد توابع
آسيب پذيري براي اين منظور، رابطه اي بين خسارات ناشي از زمين لرزه براي عناصر در معرض ريسك موجود در منطقه و پارامترهاي ثبت شده حركت زمين برقرار مي شود.

**- روش هاي بازرسي و امتيازدهي**

در اين روش ها با توجه به شرايط لرزه خيزي و شرايط ساخت و ساز براساس مشاهدات خرابي در زلزله هاي گذشته، فرم هاي امتياز دهي ويژه اي تهيه مي شوند. بازرسان ساختمان و يا انواع ديگر سازه ها، با استفاده از اين فرم ها به هر يك از عوامل مؤثر بر آسيب پذيري لرزه اي سازه از قبيل وضعيت كاربري و اهميت سازه، سيستم باربر قائم، سيستم لرزه بر جانبي، كيفيت اتصالات، شكل پذيري اعضا، نحوه ساخت، شرايط محل ساختمان، وضعيت پي و ... امتيازاتي اختصاص مي دهند. با جمع زدن امتيازات مي توان تشخيص داد كه سازه مورد نظر آسيب پذير است يا خير، در صورتي كه توسط اين روش مشخص شود كه سازه آسيب پذير است و احتياج به ترميم و بهسازي دارد از روش هاي دقيق تر ارزيابي آسيب پذيري استفاده مي شود. بنابراين به كمك روش هاي امتياز دهي مي توان نوعي غربال كردن انجام داد و با صرف تلاش نسبتاً كمي سازه هاي با ريسك كمتر را از محدوده ي سازه هاي مورد مطالعه حذف نمود [35].

**- روش هاي تحليلي ارزيابي آسيب پذيري**

روش هاي تحليلي ارزيابي آسيب پذيري بر اساس انجام تحليل مدل هاي رياضي سازه بنا شده است. با اعمال زلزله هاي متفاوت با شدت هاي متفاوت به سازه و انجام تحليل روي مدل رياضي سازه، مقادير مختلف آسيب كه همان شاخص هاي آسيب هستند محاسبه مي شوند. اين روش نسبت به طبقه بندي و امتيازدهي دقيق تر و هزينه برتر مي باشد هر زمان پس از انجام روش هاي تجربي نياز به اطلاعات بيشتري در مورد آسيب پذيري سازه باشد از اين روش استفاده مي گردد [30].

 **- روش هاي آزمايشگاهي ارزيابي آسيب پذيري**

در اين روش پاسخ لرزه اي مدلي از سازه يا جز سازه اي توسط آزمايش هاي سيكليك استاتيكي، ديناميكي و يا شبه ديناميكي تعيين مي گردد. به علت هزينه ي بالاي روش هاي آزمايشگاهي، ارزيابي آسيب پذيري خصوصاً براي مدل هاي هم مقياس تنها براي سازه هاي خاص و ارزيابي صحت نتايج حاصل از روش هاي ارزيابي آسيب پذيري خصوصاً روش هاي تحليلي، استفاده
مي گردد همين طور يكي از منابع كاليبره كردن مدل هاي استفاده شده در روش هاي تحليل آسيب پذيري استفاده از نتايج روش هاي آزمايشگاهي مي باشد [34].

**- ارزیابی تحلیلی آسیب پذیری سازه**

انجام ارزيابي آسيب پذيري سازه به صورت تحليلي را مي توان به صورت زير مرحله بندي كرد:

1- تعيين پارامترهاي لرزه اي ساختگاه 2 - مدل سازي سازه مورد نظر 3 - تحليل سازه 4 - بررسي نتايج تحليل براي مشخص كردن مقدار آسيب پذيري سازه [30].

يكي از نكات مهم در تحليل نظري آسيب پذيري انتخاب توابع مناسبي از مقادير پاسخ كه از تحليل مدل مكانيكي تحت اثر مجموعه اي از حركات ورودي بدست آمده اند مي باشد، به طوري كه اين توابع بتوانند درجه خرابي و يا آسيب وارده به يك عضو از سازه و در قسمت بعد آسيب وارده به كل سازه را نشان دهند. به اين توابع معمولا تابع آسيب و به مقدار بدست آمده از آنها شاخص آسيب گفته مي شود. اين شاخص ها مي توانند تابعي از يك يا چند متغير باشند و هر متغيير مي تواند نشان دهنده يك تغيير شكل در سازه باشد مانند جابجايي و دوران. شاخص هاي آسيب به دو دسته كلي و موضعي تقسيم مي شوند كه مي توان برحسب مقدار وسعت قسمت آسيب ديده يا آسيب پذير سازه اين دو را از هم تفكيك نمود. در زمينه شاخص كلي و موضعي در بند 2-4-1 فصل دو توضيحاتي ارائه شده است.

**- ارزيابي تفصيلي آسیب پذیری مطابق با [[5]](#footnote-5)FHWA – 95**

**- جمع آوري اطلاعات**

اولين گام در ارزيابي تفصيلي بدست آوردن جمع آوري اطلاعات پل مي باشد اطلاعاتي در خصوص نوع پل، سيستم و رفتار پل، نقشه هاي اجرايي، وضعيت كنوني پل، گزارش آسيب ديدگي هاي پل، منطقه قرار گيري و روش تحليل آن مي تواند اطلاعات خوبي در خصوص مقاومت پل مورد نظر به ما بدهد [36].

**-** **بازرسي محلي**

قانون فدرال فعلي ايالات متحده مقرر مي دارد كه تمامي پل هايي كه طول آنها از 40 فوت (حدود 12 متر) بيشتر است بايد به عنوان بخشي از استاندارد هاي بازبيني پل هاي آمريكا مورد بررسي قرار گيرند عموماً اين بازبيني ها جهت تعيين ميزان خرابي هاي سازه در برابر بار هاي زنده است و مخصوص ارزيابي لرزه اي پل ها نيست لذا معمولاً لازم است كه يك بازرسي جداگانه جهت ارزيابي كيفي لرزه اي و تعيين شرايط آسيب پذيري لرزه اي انجام گيرد يا اينكه افراد خاصي را جهت بررسي آن شرايط در طي بازرسي هاي معمول خود آموزش دهد. يك بررسي محلي پل مورد نظر براي انجام ارزيابي تفصيلي، بايد جهت تشخيص اطلاعات بدست آمده از مرور اطلاعات ثبت شده پل و اطلاعات پرسنل نگهداري و بازرسي پل انجام گيرد مواردي كه در اين بررسي ميداني بايد در نظر داشت به قرار زير است [28] و [36]:

1– تغيير مكان غير عادي تحت بارهاي بهره برداري (بارهاي عبور مرور، حرارتي و زلزله هاي خفيف)

2– شكاف غير متعارف يا لب به لب شدن درزهاي انبساط

3– شكاف هاي بزرگ بين انتهاي پل و ديافراگم ها و ديوار پيشين كوله

5– نشيمن گاههاي آسيب ديده يا با عملكرد معيوب يا ناپايدار

6– بارهاي مرده اضافي نظير روكش جاده، ابزار آلات و پياده روها كه در طرح در نظر گرفته
نشده اند

7– فرسايش غير متعارف خاك در نزديكي فنداسيون

8– حركت افقي و قائم يا كج شدگي كوله ها، ستون ها يا پايه ها

9– هرگونه انحراف از نقشه ها و ضوابط

**- ارزيابي كمي اجزاي پل**

نوع اجزايي كه لازم است جهت شكست غير قابل قبول در طي يك زلزله مورد ارزيابي قرار گيرند بسته به طبقه بندي لرزه اي پل متفاوت است از اين رو ارزيابي كمي اجزاي پل با توجه به نوع طبقه بندي پل انجام مي شود. در ادامه توضيحات بيشتري در مورد اين نوع ارزيابي ارائه می شود.

**- مطالعات كمي آسیب پذیری پل**

**- دستورالعمل ارزيابي آسيب پذيري لرزه اي پل:**

دستورالعمل مورد استفاده در ارزيابي آسيب پذيري لرزه اي، بر اساس دستورالعمل بهسازي لرزه اي پل هاي ايالات متحدهFHWA 1995 مي باشد. ضوابط فصل سوم اين دستورالعمل تحت عنوان ارزيابي تفصيلي پل هاي موجود در اين نوشتار مد نظر قرار مي گيرد. در اين فصل از دستورالعمل دو روش متفاوت جهت ارزيابي آسيب پذيري لرزه اي پل هاي موجود ارائه مي شود، روش اول مبتني بر نسبت ظرفيت(C) به تقاضا (D) اجزاي منفرد پل و روش دوم تعيين ظرفيت باربري جانبي پل به عنوان يك سيستم سازه اي مي باشد [36].

**- روش هاي ارزيابی آسیب پذیری سازه پل ها مطابق دستورالعملFHWA1995**

متداولترين روش براي بررسي تفصيلي جهت ارزيابي عملكرد لرزه اي در این دستورالعمل استفاده از تحليل الاستيك مودال و تخمين ظرفيت باربري و مقاومت اجزا مي باشد. در اين روش نسبت ظرفیت به تقاضا[[6]](#footnote-6) C/D براي هرجز به طور منفرد محاسبه می گردد. چنانچه این نسبت كوچكتر از 1 باشد نشان دهنده نياز به بهسازي عضو مي باشد. اين پرسه بر ارزيابي عضو به عضو اعضاي سازه نسبت به عملكرد يك پل به عنوان يك سيستم سازه اي استوار است. اين روش ساده بوده ليكن بر روي رفتار خاص هر عضو بيش از حد تاكيد دارد در حاليكه از اندركنش بين اجزاء متفاوت سازه و عملكرد مربوط به آنها (نيروها و لنگرها) صرفنظر مي كند. اين كار مي تواند در برخي موارد بسته به حجم ميلگرد موجود در هر عضو نتايج نادرستي به همراه داشته باشد همچنين نتايج مي توانند خطي محافظه كارانه باشند كه در نهایت به الگوي بهسازي پرهزينه و غير لازم منجر شود. روش ديگر محاسبه مقاومت جانبي پل به عنوان يك سيستم يكپارچه مي باشد. در اين روش با استفاده از تحليل افزاينده تا حالت حدي خرابي، ويژگي بار - تغييرمكان پل تا لحظه فرو ريزش تعيين مي گردد. نسبت نيروي زلزله طرح به نيروي فرو ريزش، ميزان نياز به بهسازي را براي زير سازه پل نشان مي دهد اين روش در حقيقت تعيين كننده ميزان مقاومت و شكل پذيري زير سازه است و ظرفيت تغيير شكل پذيري سيستم را مشخص مي كند. مقاومت مهم است ولي در عين حال تغيير شكل دادن سيستم بدون ايجاد آسيب عمده در آن از اهميت بالايي برخوردار است [36] و [37].

**- روش ارزيابي براساس نسبت ظرفيت به تقاضا** C/D**:**

در اين روش تقاضاي لرزه اي از يك تحليل طيفي ارتجاعي محاسبه مي گردد. ظرفيت اجزا نيز براساس مقاومت قابل انتظار اجزا و يا براساس تغيير مكان آنها بدون اعمال ضرايب كاهش مقامت محاسبه مي گردد. در ستون هاي بتن مسلح و فنداسيون هاي متعارف كه احتمال تسليم خمشي قبل از آسيب ديدگي وجود دارد نسبت هاي C/D با استفاده از تقاضاي لنگر ارتجاعي ضرب در شاخص هاي شكل پذيري جهت منظور نمودن تسليم محاسبه مي گردند. فرض بر آن است كه تغيير مكان هاي ارتجاعي و غير ارتجاعي براي يك بار زلزله مشخص بزرگي يكساني دارند. لذا مقادير واقعي تقاضاي لنگر برابر است با تقاضاي لنگر ارتجاعي تقسيم بر شاخص شكل پذيري. نتيجه آن است كه نسبت C/D در حالت ارتجاعي با يك ضريب (همان شاخص شكل پذيري) افزايش داده مي شود.

براساس بند 2-2 دستورالعمل، پاسخ ارتجاعي پل در برابر طيف ارتجاعي زمين لرزه بايد به طور مستقل براي دو راستاي متعامد طولي و جانبي پل لحاظ گردد. در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم زلزله نيز مطابق ضوابط فعلي صريحاً پيشنهاد نشده است.

انتخاب روش تحلیل به معیار منظم يا نامنظم بودن پل که تابعی از تعداد دهانه ها و توزیع وزن و سختی می باشد، بستگی دارد. همچنین طبقه بندی لرزه ای پل ها بر اساس ضریب شتاب محل و درجه اهمیت پل ها مي باشد. دستورالعمل مزبور (FHWA 1995) سه روش را جهت تحليل ارتجاعي پل ها مدنظر قرار داده است [36] و [37]:

**1 - روش بار يكنواخت**

روش بار یکنواخت ماهیتاً روشی مبتنی بر تحلیل استاتیکی و اصطلاحاً به روش استاتیکی معادل موسوم است. و تنها در حالت پل های منظم، مستوی و پل های فاقد مفصل در میانه دهانه هایشان قابلیت کاربرد است که توصیه می شود در حد مطالعات اولیه مورد استفاده قرار گیرد. این روش برای پلهای با پایه های نسبتاٌ انعطاف پذیر مناسبتر از پلهای با پایه های سخت، مانند پایه های دیواره ای شکل می باشد. در روش بار یکنواخت عملاً سازه پیوسته فرض گردیده و نیروهای ناشی از زلزله به تمامی اعضای پل با توجه به نحوۀ اعمال و خواص مکانیکی و هندسی سازه و همچنین اعضاء توزیع می گردد. این روش مبتنی بر مود ارتعاش اساسی سازه در جهات عرضی یا طولی می باشد. پریود ارتعاش سازه معادل پریود ارتعاش سیستم جرم و فنر تک درجه آزادی (معادل پاندول وارون) درنظر گرفته می شود که اساس بارگذاری آثار ناشی از زلزله در پل های منظم در مشخصات فنی AASHTO تا سال1989 بوده است. این روش در هر دو امتداد طولی و عرضی و به ویژه در امتداد عرضی برای محاسبه نیروهای معادل استاتیکی و پاسخ استاتیکی پایه- های میانی پل ها تحت تأثیر مؤلفه عرضی زمین لرزه کاربرد داشته است.

**2 – روش طيفي تك مودي:**

روش تک مودی طیفی بر این فرض استوار است که بارهای ناشی از زلزله را ميتوان به صورت نیروی معادل استاتیکی افقی در امتداد عرضی یا طولی بر سازۀ پل منظور نمود. همچنين پاسخ سازه پل به زلزله عمدتاً مرتبط با مود اول ارتعاش می باشد. این امر در مورد پلهای منظم و دارای رفتار الاستیک، درحد کاربردی می تواند قابل پذیرش باشد ولی در مورد پل های نامنظم با هندسه پیچیده، دهانه های با طول متفاوت، پایه های با سختی متفاوت، پل های دارای قوس در پلان یا در ارتفاع و پل هاي دارای زاویه تورب، تقریب قابل ملاحظه ای ارایه می دهد و نمی توان در این موارد کاربرد آن را قابل پذیرش تلقی نمود، زیرا در چنین پل هایی معمولاً برخی از مودهای دیگر ارتعاش سازه نیز در توزیع نیروها و نحوه پاسخ تغییرمکانی سازه دخالت قابل ملاحظه ای خواهند داشت.

**3 – روش طيفي چند مودي:**

همانطور كه مي دانيم پاسخ واقعي پل در خلال زمين لرزه سهمگين معمولاً از محدوده ارتجاعي فراتر خواهد رفت. پاسخ غير ارتجاعي و يا غير خطي سيستم ناشي از تسليم اجزا نظير ستون ها، فنداسيونها و همچين رفتار غيرخطي خاكريز كوله، درزهاي انبساط و شمع ها مي باشد. اما به دليل مشكلاتي كه بر سر راه تحليل هاي غير ارتجاعي قرار دارد استفاده از اين روش ها معمولاً اجباري نيست. استفاده از يك تحليل ارتجاعي مبتني بر اصول مكانيك سازه ها جهت شبيه سازي پاسخ واقعي سازه يك پل مبتني بر اين فرضيه است كه تغيير مكانهاي ارتجاعي و غير ارتجاعي مقادير مشابهي دارند. يكي از اين دلايل اين است كه در مورد سيستم پل ها محل تسليم شدن ستون تا حدودي قابل پيش بيني است. ناگفته نماند كه اختلاف ميان نتايج پاسخ ارتجاعي و غير ارتجاعي براي اجزاي منفرد سازه همانند مقيد كننده هاي طولي، قابل ملاحظه و غير قابل صرفنظر كردن است. روش آنالیز طیفی چند مودی، نسبت به روش آنالیز طیفی تک مودی، پیچیده­تر بوده و روش مؤثری برای آنالیز پاسخ سازه­های الاستیک خطی پیچیده­تر، در مقابل تحریکات زلزله می باشد. این روش برای سازه­های با هندسه، جرم و سختی نامنظم، مناسب می­باشد.

نيروهاي بدست آمده از يك تحليل ارتجاعي تنها زماني به واقعيت نزديك هستند كه جزء مورد نظر به تسليم نرسد و رفتار غير خطي از خود نشان ندهد. بر اساس دستورالعمل فوق در مناطق با لرزه خيزي بسيار بالا و براي پل هاي نامنظم، استفاده از روش تحليل طيفي چند مودي الزامي است.

**- تعيين مقدار آسيب پذيري به روش کیفی و کمی**

تعيين مقدار آسيب موجود در پل ها به دو روش كيفي و كمي انجام می شود [37]:

**1) روش هاي كيفي**

در اين روش لازم است با توجه به شرايط لرزه خيزي محل و شرايط ساخت و بر اساس زلزله هاي گذشته فرم هاي ويژه اي تهيه شود. بازرسان با استفاده از اين فرم ها اطلاعاتي از قبيل سيستم باربر قائم، سيستم لرزه بر جانبي، كيفيت اتصالات، وضعیت نشیمن گاه عرشه، شكل پذيري اعضا و قسمت هاي مهم ديگر سازه را در يك بانك اطلاعات رايانه اي ذخيره مي كنند. از روش هاي كيفي مي توان براي برآورد اوليه و تقريبي ظرفيت و مقاومت سازه يك منطقه خاص استفاده نمود. اما باید دانست که قضاوت تصميم گيري در مورد تقويت يا تخريب سازه با استفاده از اين روش ها دشوار است و باید از روش های مناسب تر استفاده نمود.

2) **روش هاي كمي**

در روش كمي روند ارزيابي آسیب پذیری سازه با دقت بيشتري مورد مطالعه قرار مي گيرد. در اين روش ها عموماً از مدل سازي كامپيوتري و در صورت لزوم تحليل ديناميكي غير خطي اعضاي سازه اي و غير سازه اي ضروري مي باشد. مقاومت و شكل پذيري اعضا از جمله پارامتر هاي مهم براي تعيين آسيب پذيري مي باشند كه مي توانند با روش هاي تجربي و نيز آزمايش مدل ها تعيين شوند.

روند ارزيابي يك پل به روش ظرفيت به تقاضا در نمودار (3-1) آورده شده است.



نمودار (3– 1) روند ارزيابي يك پل با استفاده از روش ظرفيت به تقاضا [37]

**- روش ارزيابي براساس مقاومت جانبي سازه پل**

در اين روش از ضرايب اصلاح پاسخ استفاده مي شود كه شاخص نسبتاً ضعيفي از ميزان تقاضاي شكل پذيري اجزا به شمار مي رود به علت وجود عدم قطعيت ها و فقدان روش هاي مناسب جهت انجام تحليل هاي تاريخچه زماني، يك روش ساده تحليل قاب به قاب است. در اين روش پل به قطعاتی (يا قاب هايي) تقسيم­بندي مي شود كه هر كدام از آنها جداگانه مورد ارزيابي قرار داده
مي­شوند. يك روش مكانيسم خرابي افزايش يابنده يكنواخت به هر قاب اعمال مي شود تا اجزاي بحراني مشخص گردد و بتوان يك نمودار بار تغيير مكان براي قاب بدست آورد. با محاسبه پريود طبيعي اين قسمت از كل سازه و طيف پاسخ طرح، پاسخ ارتجاعي معادل آن تخمين زده مي شود و نسبت سطح زلزله طرحي كه جزء سيستم بدون ايجاد فروريزش مي تواند تحمل كند محاسبه مي گردد. استفاده از اين روش مستلزم داشتن اطلاعات در خصوص ظرفيت مقاومت و تغيير شكل اجزا مي باشد [36].

**- مباني مدل سازي سازه اي**

امروزه به علت هزينه هاي قابل توجه اجراي سازه ها و به منظور درك عميق تر رفتار آنها تحت بارهاي مختلف و پيچيده نظير زلزله، مدل سازي سازه اي به صورت تجربي (فيزيكي) يا رياضي از جايگاه ويژه اي برخوردار است. به طور كلي مي توان گفت كه از طريق ساخت يك مدل براي هر پروژه خصوصا پروژه هاي مهم و حياتي نظير پل ها، مي توان تا حدودي، حاشيه هاي اطمينان ناشي از درك نادرست يا نه چندان دقيق سازه ها و بارهاي وارده در طول عمر مفيد آنها را به حداقل رساند به طور كلي مدل هاي سازه اي را مي توان سه دسته دانست [38]:

**- مدل واقعي**

پس از وقوع زلزله هاي مخرب اخير، در كشور هاي پيشرفته بسياري از پل ها به شتابنگار مجهز شدند تا بتوان اطلاعات ثبت شده در طول لرزش زمين را مورد بررسي قرار داد. با اين روش
مي توان اطلاعات مفيدي به دست آورد كه اين داده ها مي توانند مبناي مقايسه اي با روش هاي تحليلي گردند. از جمله فعاليت هاي ديگري كه مي­توان روي نمونه واقعي سازه انجام داد
آزمايش هاي ارتعاش آزاد يا ارتعاش اجباري است كه طي آنها مشخصات ديناميكي سازه استخراج مي­گردد.

**- ساخت مدل آزمايشگاهي با ابعاد كوچكتر از ابعاد واقعي:**

در مواقعي كه امكان آزمون سازه حقيقي وجود ندارد مي توان ابزار آزمايشگاهي را براي مدل سازي به كار بست. در اين روش مهمترين عامل تأثير گزار در ساخت مدل، انتخاب مقياس مناسب براي هندسه و مصالح سازه است چرا كه درصورت انتخاب مقياس نادرست ممكن است اثر برخي پارامترهاي مهم سازه اي حذف يا مخدوش گردد.

**- به كار گيري مدل تحليلي:**

با توجه به مشكلات فراوان و هزينه هاي سنگين دو روش اول، توسعه چشم گير امكانات
سخت افزاري و ايجاد رايانه هاي قدرتمند ساخت نرم افزارهاي تحليل غير خطي سازه ها كه بر اساس تئوري هاي قوي پايه گذاري مي شوند. امروزه مدل سازي رياضي به كمك كامپيوتر معمولاً به دو روش نخست ترجيح داده مي شود. البته اين بدان معنا نيست كه با اكتفاي صرف به اين مدل ها هميشه مي توان به جواب هاي دقيق و واقعي دست يافت بلكه بايد در صورت وجود امكانات آزمايشگاهي، اين روش را به عنوان تصديق آنها و به موازات آزمايش به كار گرفت. برتري اصلي روش هاي تحليلي آن است كه در آنها تغيير پارامترها بر روي مدل داراي محدوديت بسيار كمي است و امكان بررسي سازه تحت شرايط مختلف از جمله بارگذاري و نحوه اعمال آن و همچنين تغيير در ويژگي هاي هندسي و مكانيكي وجود دارد. موضوع اساسي در مدل سازي تحليلي به منظور تحليل لرزه اي، توصيف هندسه، جرمي كه در لرزش شركت مي كند، شرايط مرزي، اتصالات و بارگذاري سازه است اعضاي منفرد كه اجزاي سازه يا كل آن را شبيه سازي
مي كنند در گره ها به هم متصل مي گردند و تغيير مكانهاي گرهي به عنوان مجهول در نظر گرفته مي شوند [38]. در هر جز روابط بين نيروهاي انتهايي و تغيير مكان ها به صورت ذيل تعريف ميگردند.

1-روابط سينماتيك كه تغيير مكانهاي گرهي را به تغيير شكل ها و كرنش هاي داخلي مرتبط مي كنند.

2- روابط مشخصه كه كرنش هاي داخلي را به تنش ها ارتباط مي دهند.

3- روابط ايستايي كه تنش هاي داخلي را در هر نوع رفتار شامل خطي و غير خطي به بارهاي گرهي مربوط مي سازند [30].

**- انتخاب روش مدل سازي تحليلي:**

همواره چه در مرحله مدل سازي و چه پس از آن يعني فاز هاي تحليل و بررسي نتايج بايد توجه داشت كه رايانه كه امروزه يك وسيله انجام شبيه سازي به شمار مي رود، تنها يك ابزار است و براي نيل به نتيجه صحيح و نزديك به واقعيت بايد قضاوت مهندسي نيز مدنظر قرار گيرد. عوامل بسياري را مي توان در تعيين پارامترهاي مدل سازي سهيم دانست. اين فاكتورها بايد جنبه هايي چون پيچيدگي سازه تحت بررسي، انواع بارهاي وارده و مقصود نهايي تحليل را تحت تاثير قرار دهند تفاوت مدل سازي و تحليل بين دو مقوله طرح پل هاي جديد و ارزيابي آسيب پذيري
پل هاي موجود در آن است كه در طراحي پل هاي جديد ابزار مدل سازي و تحليل به منظور تعيين تقاضاي لرزه اي برحسب نيرو ها و تغيير مكان هاي اعضا مي باشد اين در حالي است كه براي ارزيابي اجزاي پل تاكيد روي كمي ساختن ظرفيت و مقاومت موجود اعضاي سازه است [9]. اين دو مقوله در نمودار (3-2) از هم تميز داده شده اند.



نمودار (3-2) روند تحليل لرزه اي پل به منظور طراحي يا ارزيابي آسيب پذيري [9]

**- روش هاي گوناگون مدلسازي سازه پل**

مدل سازي پل ها جهت تحليل لرزه اي به سه روش انجام مي شود كه در تصویر (1-3) اين روش ها به صورت تصويري نشان داده شده است. به اختصار مي توان اينگونه بيان كرد كه در اين روش ها مدل با پارامتر متمركز از ساده ترين و مدل اجزاي محدود از پيچيده ترين و بهترين نوع مدل سازي براي رسيدن به پاسخ مناسب از رفتار سازه مي باشد [9] و [38].

**- مدل هاي با پارامتر متمركز[[7]](#footnote-7)**

در اين مدل ها ويژگي هايي نظير جرم سختي و ميرايي در نقاطي گسسته[[8]](#footnote-8) متمركز مي­گردد اين روش از ساده ترين فرمول بندي رياضي برخوردار است و به مهارت و تجربه زيادي در خصوص شبيه سازي روابط بار - تغييرشكل اجزاي ايده آل سازي شده براي بيان رفتار سازه نياز دارد.

**- مدل هاي اجزاي سازه اي[[9]](#footnote-9)**

اين مدل ها براساس جزء سيستم هاي سازه اي بنا شده اند. در اين مدل، اعضا به هم متصل
مي گردند طوري كه هندسه پل تشكيل گردد. همچنين مشخصات پاسخ سازه بر حسب روابط بار- تغيير شكل اعضا در هر جزء سازه يا جزء سيستم بيان مي گردد.



شکل (3-1) سطوح متفاوت مدل سازی جهت تحلیل لرزه ای [9]

**- مدلهاي عناصر محدود**[[10]](#footnote-10)

با ابداع روش عناصر محدود [38] در مكانيك سازه‎اي در دهه 1960 و ارائه فرمول بندی پيچيده اما كاراي آن، اين مدل‌ها پا به عرصه وجود نهادند. در اين مدل ها هندسه پل به تعداد زيادي المان های كوچك با ویژگی های رفتاري كه مستقيماً با خواص مادی و هندسي آنها مرتبط است تقسيم بندی می گردد. در اين مدل ها مجهول مسأله، تغییرمکان های تعميم یافته در درجات آزاديي هستند كه در گره های المان ها وجود دارد. دو مدل قبل براي بيان رفتار غيرخطي مادي و هندسي داراي مشكلاتي هستند، همچنين در صورت استفاده از تعداد المان های كافي (مش بندی بهينه) مدل عناصر محدود، رفتاري بسيار شبيه سازه واقعي ارائه خواهد داد. امروزه با بكارگيري نرم افزارهایی كه بر اساس روش عناصر محدود ایجاد گشته اند از اين مدل‌ها براي بيان رفتارهاي مختلف سازه ها و از جمله پل ها مانند رفتارهاي پيچيده چرخه ای و يكنواخت استفاده می شود و براي مقاصد مهمي نظير طراحي و ارزيابي، نتايج تحلیل های انجام شده با اين مدل‌ها مطمئن ترین نتايج خواهد بود. نكته ديگري كه جلب توجه می کند اين است كه از آنجا كه امروزه تقريباً تمامي نرم افزارهای كامپيوتري از روش اجزاي محدود براي تحليل سازه ای استفاده می کنند بايد در انتخاب المان های مورد استفاده، رفتارشان و همچنين تعداد آنها (مش بندی مدل) دقت كافي را مبذول داشت. ابعاد المان ها و تعداد آنها در برخي موارد ممكن است نتايج را به ميزان قابل توجهی دست‎خوش تغيير سازد. لذا بايد بر اساس دانش اجزاي محدود سازه ای، تجربيات گذشته و قضاوت علمي مناسب رابطه ای منطقي بين تعداد مش ها و هزينه تحليل (زمان) برقرار ساخت زيرا با افزايش تعداد المان ها و به تبع آن افزايش تعداد درجات آزادي سازه، مدت زمان تحليل به صورت تصاعدي افزايش خواهد يافت. به صورت نمونه براي طراحي جزئياتي نظير محل قطع آرماتور، محل كابل های پيش تنیدگی يا تغييرات مقطع در روسازه، معمولاً در تحلیل های مربوط به بار ثقلي بايد مدلي با مقدار ريزشدگي [[11]](#footnote-11)زياد تهيه شود اما چنين دقتي براي انجام يك تحليل ديناميكي لازم نيست.

در پل هایی با پیکره بندی پیچیده تر نظير پل های قوسی در پلان يا با تورب زياد خصوصاً براي ارزيابي عناصر روسازه نمی توان تنها به مدل میله ای اكتفا نمود. در تصویر (3-2) المان های سازه ای كه در مدل سازی سازه پل‌ها به روش عناصر محدود به كار میروند نشان داده شده است. در قسمت (الف) اين شكل المان های خطي3 نشان داده شده است، اين المان ها داراي 2 گره و 6 درجه آزادي در فضا هستند. قسمت (ب) المان های صفحه‎اي4 را نشان می دهد، اين المان مي‎تواند از 4 تا 9 گره داشته باشد. در قسمت (پ) المان های صفحه ای- پوسته ای[[12]](#footnote-12) ديده می شود، كه براي مدل سازی عناصري از پل مانند رو سازه های سلولي و همچنين پایه ها و صندوقه های (كيسون) سلولي به كار می روند. در آخرين قسمت يعني قسمت (ت) مدل سه بعدی يكپارچه2 نمايان است، از اين المان به وفور در شبيه‎سازي پایه های بتن مسلح پل ها استفاده شده است.

به طوركلي در المان های معرفی شده، تنش ها و کرنش ها به صورت مفصل و جز به جز به دست می آیند و براي ارزيابي رفتار موضعي اجزاي سازه مانند دیافراگم های عرضي و مقاطع عرشه، پایه ها و تكيه‏گاه ها مي‎توان از آنها استفاده‏ كرد.



شکل (3-2) المان‌هاي سازه‎اي مناسب براي مدل‌سازي اجزاي مختلف سازه پل ها [9]

از مواردي كه در مدل اجزاي محدود پل ها بايد بيشتر مورد توجه قرار گيرد مدل سازي كوله و ميزان انعطاف پذيري فنداسيون كوله ها مي باشد، گرچه رابطه اي با ميزان پيچيدگي بالا در خصوص نيرو - تغيير مكان كوله با يك فنرخطي و يا مجموعه اي از فنر ها اساساً رضايت بخش نيست، اما اين روش به طور مؤثر نتايج قابل قبولي را ارائه مي دهد. در يك مطالعه بهسازي اساس استفاده از فنرها در ناحيه كوله ها، مدلسازي صحيح بار ميان كوله و ستونها است. براي در نظر گرفتن سختي كوله ها بايد دقت لازم را در اتصال ميان كوله و روسازه معطوف كرد تا سختي فرض شده با بار توضيح شده روي كوله ها و در نتيجه كاهش بار ستونها حاصل گردد.

**- رفتار سازه پل**

سازه پل های موجود یا بهسازی شده از نظر قابلیت جذب و استهلاک انرژی و میزان شکل پذیری به گروه های زیر تقسيم میگردند [28].

**- سازه با رفتار الاستیک خطی**

**در مورد سازه هايی که در نظر است تحت تأثیر زلزله طراحی ماهیتاً و عمدتاً در رژیم رفتاری الاستیک باقی بماند، لازم است حاشیه اطمینان و ذخیره مقاومت مکفی در مقابل شکست ترد یا کمانش و سایر صور غیرشکل پذیر خرابی منظور گردد.**

**سازه الاستیک به سازه ای اطلاق مي گردد که یا عملاً تحت تأثیر عوامل وارده در سطح ایمنی و بهره برداری وارد حیطه رفتار غیرالاستیک نمی گردد، یا به دلیل عدم کفایت شکل پذیری، رفتار غیرخطی بروز نخواهد داد.**

**- سازه با شکل پذیری محدود**

**به اختصار، سازه هایی که قادر باشند میزان محدودی از رفتار غیر خطی را در حیطه فرا الاستیک تجربه نمایند، ولی قابلیت تشکیل مفاصل و مکانیسم های پلاستیک را دارا نمی باشند، در این گروه مورد مطالعه قرار مي گيرند.**

**- سازه با شکل پذیری زیاد**

در این نوع سازه انتظار می رود تحت تأثیر زلزله طرح، مکانیسم پلاستیک تشکیل گردد. به عنوان بخشی از مطالعات طراحی بهسازی لرزه ای، مکانیسم های محتمل پلاستیک را باید به وضوح مشخص نمود.

طرح بهسازی باید به گونه ای صورت گیرد که سیلان در اعضا و اجزای سازه و شالوده (جز شمع ها) بهسازی شده محدود به مواضعی گردد که برای بازرسی و تعمیرات پس از وقوع زلزله قابل دسترسی سریع باشند. رفتار فرای الاستیک و انواع دیگر رفتار غیرخطی باید به موارد زیر محدود گردد:

در مورد پایه های میانی بتنی مسلح (ستون ها و دیواره ها) و همچنین فولادی (ستون ها): تشکیل مفاصل پلاستیک در مواضع از پیش تعیین شده.

در اعضای فولادی: سیلان در اعضای مهاری دیافراگم های افقی و قائم و اعضای مهاری پایه های خرپایی فضاکار.

در کوله های بسته: تغییر شکل فرا الاستیک خاک پشت دیوارهای کوله ها و دیوارهای برگشتی.

اعضا، اجزا و اتصالات سازه های شکل پذیر باید ضمن برخورداری از ظرفیت کافی، تغییرشکل های اعمالی تحت بارگذاری رفت و برگشتی را بدون کاهش مقاومت تحمل نمایند.

**- روند کلی ارزیابی آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای پل ها**

1. تشریح طیف پاسخ و ویژگیهای حرکت زمین در سطوح خطر اختیارشده و نحوه تعیین آنها
2. تشریح روش شناسی در مدلسازی و تحلیل (مجموعه سازه و اعضا، تکیه گاه ها، شالوده، خاک، ... )
3. روش تعیین خواص مصالح موجود و روش شناسی در تعیین ظرفیت باربری اعضا و اجزای سازه موجود [28].
4. تشریح مسیر انتقال بارهای ثقلی و لرزه ای
5. خلاصه نتایج تقاضاهای به دست آمده از تحلیل
6. شناسايي نارسایی های موضعی و کلی سازه و دستگاه های تکیه گاهی
7. مهندسي ارزش در ارزيابي بهسازي پل
8. طرح های مناسب برای بهسازی

**مراجع**

[1] Kazuhiko, kawashima., (2010)., “Seismic Design Response Modification, and Retrofit of Bridges”, Department of Civil Engineering Tokyo Institute of Technology Meguro, Japan. vol. 59. pp. 5-35.

[2] Mitchell, d., Bruneau, m., Williams, m.; Anderson, d., Saatcioglu, m., and Sexsmith, r., (1995)., “Performance of bridges in the 1994 Northridge earthquake”, Journal, Civil Engineering.vol. 22. pp. 415-427.

[3] Gasemi, h., Cooper, j.d., Imbsen, r., Piskin, h., Inal, f., and Tiras, a., (2000)., “The November 1999 Duzce Earthquake: Post-Earthquake Investigation of the Structures on theTEM ”, Publication. FHWA - RD -00-146.

[4]P.chang, ltuang., Yaau, t.hse., Antonio, nanni., (2000)., “Ease Sment and Proposed Structural Repaier Strate Gies For Bridge Piers in Taivan Damaged by the ji-ji Earthquake**”,** Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada.vol. 9. pp. 593-600.

[5]Jennings, s.p.c., Et, al., (2002)., “Engineering Features Of The San Fernando Earthquake February 9,1971”,.Laboratory Report EERL 71-02, California Institute of Technology.

[6] Rashidi, s., Saadeghvaziri, m.ala., (1997)., “Seismic Modeling of Multi-Span Simply-Supported Bridges Using ADINA”, Computers & Stryctures, vol. 64. pp. 1025-1039.

 [7] افراسیابی، ع.، (1377)، "بررسی امکان فرو افتادن عرشه پل ها در هنگام زلزله"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- زلزله، دانشکده فنی- دانشگاه تهران.، ص 7-33.

[8] Nielson, b.g., and DesRoches, r., (2007)., “Seismic performance assessment of simply supported and continuous multi span concrete girder highway bridges”, Journal of Bridge Engineering, vol. 12. pp. 611-620.

[9]. Priestley, m.j.n., F. seible., Calvi, g.m., (1996)., “Seismic Design and Retrofitof Bridges”, New York, NY: John Wiley & Sons. pp. 586-589.

[10] Japan Road Association., (1998)., “Reference For Seismic Retrofit of Existing Highway Bridges”, Maruzeh, Tokyo., Japan.vol. 195. pp.35-45.

[11] Fujino, y., Hashimoto, s., and Abe, m., (2005)., “Damage Analysis of Hanshin Expressway Viaducte during 1995 Kobe Earthquake., I: Residual Inclination of Reinforced Concrete Piers**”**, Journal of Bridge Engineering ASCE. vol. 10. pp. 40-61.

[12] Shigeki, unjoh., Toru, terayama., Yukio, adachi., Jun-ichi, hoshikuma., (2000)., “Seismic retrofit of existing highway bridges in Japan”, Journal: [Cement & Concrete Composites](http://libra.msra.cn/Journal/6737/cement-concrete-composites-cement-%26-concrete-composites)., vol. 22. pp. 2-23.

[13] AASHTO (1996) Standard Specifications For Highway Bridges, 16 th ed., American Association Of State Highway and Transportation Offucials, Washington D.C.

 [14] AASHTO (2012) LRFD Bridge Design Specification American Association of State Highway & Transportation Officials 6th Edition Washington D.C.

[15] Zand, k., (1999)., “Seismic Vulnerability of Highway Bridges in Iran”, Proceedings of Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (see3), Tehran, Iran. vol. 2. pp. 1015-1020.

 [16] Maheri, m. r. (1990) “Engineering Aspects of the Manjil, Iran Earthquake of 20 June 1990”, Afield Report by EEFIT Earthquake Engineering Field Investigation Team, Institute of Structural Engineering, London.

[17] علي اكبر معين فر، عباس مهدويان، و ابراهيم مالكي.، (1373)، ”مجموعه اطلاعات پايه زلزله هاي ايران“، ناشر، تهران، مؤسسه نمايشگاههاي فرهنگي ايران.

 [18] ATC/FHWA ( 1983)., “Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges”, Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Redwood City, California. Also Published by Federal Highway Administration as Report FHWA. RD-83-007.

[19] Zahrai, s.m., Bruneau, m., (1998)., “Impact of Diaphragms on Seismic Response of Straight Slab-on-Girder Steel Bridges”, ASCE, Journal of Structural Engineering vol. 124. pp. 938-947.

[20] Kotsoglou, a.n., Pantazopoulou, s.j., (2009). “Assessment and modeling of embankment participation in the seismic response of integral abutment bridge”, Bulletin of Earthquake Engineering 2009, Springer, Issue. vol. 7. pp. 343 - 361.

 [21] نیکنام، ا.، (1369).، " لزوم معاینه پل های موجود با به کارگیری روش های تحلیل دینامیکی و بالا بردن مقاوت آنها با سیستم ایزولاسیون پایه ها"، مجموعه مقالات ارائه شده در اولین کنفرانس بین المللی پل، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[22] تهرانی زاده، م و افتخاری، م.، (1374)، "تاثیر سیستم های لرزه جدایش بر رفتار دینامیکی پل ها در برابر زلزله"، چاپ اول، تهران، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

[23] حاجی رسولی ها، ا.، (1378)، " تحلیل دینامیکی غیر خطی پل های بتنی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده عمران- دانشگاه صنعتی شریف. ص17-35.

 [24] Banon, h., Biggs, j,m., Irvine, m., (1981)., “Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames”, ASCE. Journal of Structural Engineering, vol. 107. pp. 1705-1812.

[25] Powell, g.h., Allahabadi, r.,(1988), “Seismic Damage Prediction by Deterministic Methods: Concepts and Orucedures”, Earthquake Engineering and Structural dynamics,. vol. 16. pp. 719-734.

[26] Williams, m.s., Sexsmith, rg., (1995)., “Seismic Damage Indices For Concrete Structures”, Astate- of-the- Review: Earthquake Spectra., vol. 30. pp. 320-350.

[27] Sorac, s., (1998)., “Seismic Damage Assessment of Steel Frames” ASCE, Journal of Structural Engineering, vol. 124. pp. 530-545.

[28] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.، (1390)، "راهنمای بهسازی لرزه ای پل ها"، نشریه 511 – معاونت نظارت راهبردی دفتر نظام فنی اجرایی.

[29] معاونت برنامه ريزي و نظارت راهبردي.، ( 1386 )، " دستورالعمل طراحي پل هاي فولادي "- نشريه شماره 395 - دفتر نظام فني و اجرايي.

[30] Dolce, m., Kappos, a., Zuccaro, g., Coburn, a.w., (1994)., “Report of the EAEE Working Group 3: Vunerability and Risk Analysis”, Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna. vol. 8. pp. 130-138.

[31] Yao, j.p., Toussi, s., and Sozen, m.a., (1982)., “Damage Assessment from Dynamic Response Measurements,” Proceedings, Ninth U.S National Conference on AppliedMechanics, ASME, vol. 5. pp. 315-322.

[32] Agrawal, j., Blokley, d., Woodman, n., (2003)., “Vulnerability of Structural Systems,” Structural Safety, vol. 25. pp. 263-268.

[33] Lind, n.c., (1995). “A Measure of Vulnerability and Damage Tolerance” Reliability Engineering and System Safety. vol. 48. pp. 1-6.

[34] Petrovski, j., Nocevski, n., Milutinovic, z., Vlaski, v., (1991)., “Development of Vulnerability Functions of Non-Earthquake Resistant Apartment Buildings based on the Observed Damage after Skpoje 1963 Earthquake and Comparsion of the Selected Vulnerability Functions “, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University "Cyril and Methodios", Skopje, Yugoslavia.

[35] SAP 2000., “Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures: Analysis Refrence Manual (2007)”, Computer and Structures, Inc, Berkeley,CA

[36] FHWA., (1995)., “Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges", FHWA-RD-95-052., Mclean: office of Engineering and HighWay operations R and D, 16 ed.

[37] FHWA., (2006)., “Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures": Part 1 – Bridges, Federal Highway Administration., Report: FHWA-RD-04-XXX, Jan 2006, Virginia.

[38] Chen, w,f., Duan, l., (1999)., “Bridge Engineering Handbook”, CRC Press, Florida**,** USA.

[39] طاحوني ، ش.، (1390) ", طراحي پل"، انتشارات دانشگاه تهران.

[40] قلي پور. ي و بيرقي. ح.، (1380) ",مباني مهندسي ارزش"، تهران، انتشارات ترمه.

[41] جبل عاملي، ف م.، قوامي فر، ك.، عبايي ، م.، ( 1383) ", جايگاه مهندسي ارزش در مديريت پروژه "، تهران، انتشارات سازمان مديريت و برنامه ريزي كشور.

[42] Yan, xiao., AND Hui, wu., (2003)., “Retrofit of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jackets”, Journal of Structural Engineering, vol. 129. pp. 119-129.

[43] Teng, j.g., Chen, j.f., Smith, s.t., and Lam, l., (2002)., “FRP Strengthened RC Structures”, (John Wiley, and Sons,. West Sussex, England, vol. 2. pp. 1-10, 100- 108, 148-236.

[44] Seible, F., Priestley, m.j.n., Hegemier, g.a., and Innamorato, d., (1997). “Seismic Retrofit of RC Columns With Continuous Carbon Fiber Jackets”, Journal of Composites For Construction. vol. 3. pp. 1, 52-62

[45] Zamani, Nejad, S., and Rahaee, a,r., (2004)., “Performane Accesment of Strengthened Concrete Components with FRP and Compare to Carbon Fibers”., MSc. Thesis, Amir Kabir Universit. pp. 2-7-19.

[46] Lopez, a., Galati, n., Alkhardaji, t., Antonio, nanni., (2007).,“ Strengthening of a Reinforced Concrete Bridge With Externally Bonded steel Reinforced Polymer (SRP)”. Journal of Structural Engineering , USA. vol. 89. pp. 3-9.

[47] Sadeghian, p., Shekari, a.h., and Mousavi, f., (2009)., “Stress and strain behavior of slender concrete columns retrofitted with CFRP composites.” Journal of Reinforced Plastics and Composites, SAGE, vol. 28. pp. 19, 2387-2396

[48] Esfahani., m,r., and Kianoush, m.r., (2005)., “Axial compressive strength of reinforced concrete columns wrapped with fiber reinforced polymers”, International Journal of Engineering transactions., B: Application. vol. 18. pp. 9-19.

1. 1 Damage Probability Matrices [↑](#footnote-ref-1)
2. Yao [↑](#footnote-ref-2)
3. Aggarwal and colleagues [↑](#footnote-ref-3)
4. Lind [↑](#footnote-ref-4)
5. 1 Federal HighWay Administration [↑](#footnote-ref-5)
6. Capacity Relative to Demand1 [↑](#footnote-ref-6)
7. 1 Lumped Parameter Models (LPM) [↑](#footnote-ref-7)
8. Discrete Locations 2 [↑](#footnote-ref-8)
9. Structural Component Models (SCM)3 [↑](#footnote-ref-9)
10. Finite Element Models(FEM)1 [↑](#footnote-ref-10)
11. Refining 2

 Line Elements 3

 In-Plane Elements 4 [↑](#footnote-ref-11)
12. Plate/Shell Elements 1

 D Solid Elements 2 [↑](#footnote-ref-12)