

آزمایش استاتیک و دینامیک پل قوسی بتنی اکبرآباد

محمدصادق معرفت

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

شروان عطایی

دانشجوی دکتری سازه - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

اسماعیل قهرمانی گرگری

کارشناس ارشد ژئوتکنیک - گروه خط و ابنیه - مرکز تحقیقات راه آهن

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۱/۲، تاریخ تصویب ۸۱/۹/۱۶)

چکیده

برای ارزیابی مقاومت باقی مانده پل راه آهن اکبرآباد، آزمایشهای دینامیک و استاتیک بر روی پل انجام شد. پل مزبور پنج دهانه ۶ متری داشته و بصورت قوسی و از بتن غیر مسلح ساخته شده است. در آزمایش دینامیک، دیزل ۶ محوره ۱۲۰ تنی با سرعتهای مختلف از روی پل عبور داده شد و ارتعاشات دهانه میانی اندازه گیری شد. در آزمایش استاتیک ۵۰۰ تن بار گسترده بر دهانه میانی پل وارد شد و تغییر مکانها اندازه گیری گردید. رفتار پل در تمام مراحل بارگذاری، خطی و الاستیک باقی ماند. رفتار دینامیک پل حاکی از میرایی زیاد بود چنانچه نوسان پل پس از عبور قطار به سرعت زایل گردید. جهت مدلسازی، از اجزای محدود دودویی استفاده شد و مدل با نتایج آزمایشهای استاتیک و دینامیک بهنگام گردید. با پردازش سیگنالهای دینامیک، فرکانس طبیعی برابر ۱۴/۶ هرتز و ضریب ضربه معادل ۱/۳۵ محاسبه شد. مطالعات نشان داد با وجود گذشت بیش از ۶۰ سال از ساخت پل، و وجود ترک های عمیق در مقاطع حساس، پل هنوز دارای مقاومت چند برابر بار استاندارد می باشد. با عنایت به نادر بودن آزمایشهای میدانی بر روی پلهای قوسی بتنی، نتایج آزمایش حاضر، اطلاعات ارزشمندی در مورد اینگونه پلها ارائه می کند.

واژه های کلیدی: آزمایش بارگذاری پل، پل قوسی بتنی، پل راه آهن، به هنگام کردن مدل اجزاء محدود، آزمایش استاتیک، آزمایش دینامیک، ضریب ضربه، ارزیابی مقاومت باقی مانده

مقدمه

پل اکبرآباد دارای ۵ دهانه ۶ متری بوده و در کیلومتر ۲۴ راه آهن قدیم تهران - قم واقع شده است (شکل ۱). سازه پل از نوع قوسی بتنی غیرمسلح می باشد و بیش از ۶۰ سال از زمان ساخت آن می گذرد. وجود یک ترک تمام عمق و نسبتاً ضخیم در کلید قوس هر دهانه، اظهار نظر پیرامون ظرفیت باربری مجاز پل را با چالش مواجه می کند و اندیشه به پایان رسیدن عمر مفید سازه را قوت می بخشد. این ترک به پهنای تقریبی دو سانتیمتر در تمام عرض کلید پل امتداد یافته و تمام قوس را در برگرفته است. پهنای ترک از پایین به بالا کاهش یافته و در نیمه بالایی ضخامت قوس بسته به نظر می رسد. آثار

ارزیابی مقاومت باقیمانده سازه های موجود از مباحث مورد توجه مهندسان و محققان می باشد. در این ارزیابی، نیاز به مدلسازی رفتار سازه وجود دارد. پیچیدگی موجود در رفتار برخی سازه ها، انجام مطالعات و تحقیقات دقیق تری را برای مدلسازی آنها طلب می کند که انجام آزمایش های میدانی جزء لاینفک آن می باشد. در سالیان اخیر، آزمایش بارگذاری پلها، از جمله پلهای با مصالح بنایی، در نقاط مختلف جهان انجام شده است [۱]. در مقاله حاضر، گزارشی از بارگذاری دینامیک و استاتیک پل راه آهن اکبرآباد، مدلسازی عددی، و ارزیابی مقاومت باقی مانده آن ارائه می گردد.



شکل ۱: بارگذاری پل قوسی بتنی اکبرآباد در آزمایش استاتیک.

نوع تست بستگی به عواملی نظیر هدف آزمایش، مجاز بودن تخریب، و ادامه سرویس پل پس از تست بستگی دارد. به طور کلی در آزمایش ها انجام مدلسازی عددی یک ضرورت است. زیرا به کمک شبیه سازی می توان پاسخ پل را در شرایطی متفاوت مطالعه نمود و اطلاعات به دست آمده از آزمایش را تکمیل کرد.

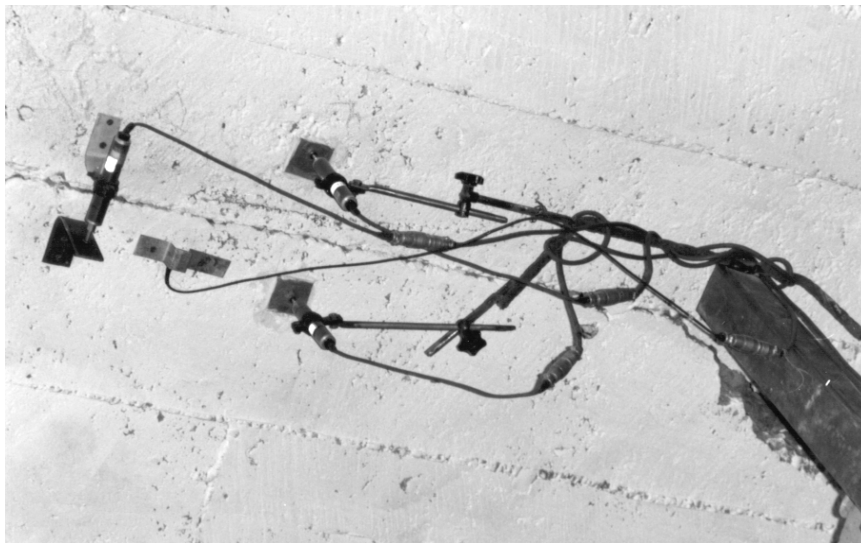
برای شبیه سازی رفتار پل یک مدل اجزاء محدود در نظر گرفته شد. در این مدل، اجزای مختلف سازه شامل قوسها، پایه ها، پی ها، دیوارهای جانبی و بتنهای پرکننده و خاک، بصورت دو بعدی مدلسازی شد. جهت ایجاد هماهنگی بین مدل عددی و آزمایش های دینامیکی و استاتیکی، خواص مکانیکی اعضای سازه، آنقدر تغییر داده شد تا نزدیکی مناسبی بین مدل عددی و آزمایش بدست آمد. به کمک این مدل عددی، امکان مطالعه رفتار پل تحت شرایطی متفاوت با شرایط آزمایش فراهم گردید. با اعمال بارگذاری استاندارد UIC ۲۵ تن بر مدل عددی و با استفاده از ضریب ضربه محاسبه شده در آزمایش، ظرفیت سرویس مجاز پل به مقداری چندین برابر بار موجود افزایش یافت و نشان داد که علیرغم گذشت بیش از ۶۰ سال از عمر پل مقاومت آن با مشکلی مواجه نمی باشد.

تخریب مهم دیگری نظیر قلوه کن شدن و تخریب شیمیایی در بتن سازه دیده نمی شود. جهت نیل به قضاوتی واقع بینانه از مقاومت موجود پل، انجام آزمایشهای دینامیکی و استاتیکی در دستور کار قرار گرفت. خصوصیات هندسی پل در جدول (۱) ملاحظه می شود.

جدول ۱: خصوصیات هندسی پل کیلومتر ۲۴ (اکبرآباد).

نام پل	اکبر آباد
دهانه (متر)	۶
بلندای قوس در وسط دهانه (متر)	۳
ضخامت قوس در کلید (متر)	۰/۷
شکل قوس	نیمدایره
جنس قوس	بتن
ضخامت دیوار جانبی (متر)	۱
جنس دیوار جانبی	بتن
عرض پل (متر)	۳/۹
عمق پرکننده در کلید (متر)	۱

آزمایش بارگذاری پل به انواع مختلفی تقسیم می شود که می توان به مواردی نظیر تست بار نهایی، تست بارگذاری تکمیلی، و تست عیب یابی اشاره نمود. انتخاب



شکل ۲: ترک در محل کلید قوس و تغییر مکان سنج ها و یکی از شتاب سنج های نصب شده در محل ترک.

آزمایش دینامیکی

(۱۲/۳۳ متر) بر زمان مزبور محاسبه شده است. جهت محاسبه زمان مزبور از تابع خود همبستگی^۱ سیگنال های تغییرمکانی استفاده شده است. همانطور که در شکل های (۳) و (۴) دیده می شود، منحنی های شتاب و تغییرمکان دارای دو پیک نسبتاً بزرگ می باشند که منطبق بر لحظه عبور دو محور بوژی های جلو و عقب دیزل می باشد. در این نقاط دامنه شتاب و تغییرمکان قابل توجه بوده و تحریک سازه در اثر بار دینامیکی آشکار می باشد. اما بلافاصله پس از عبور دیزل، دامنه نوسانات به سرعت زایل شده است. این نحوه رفتار نشاندهنده میرایی بالای سازه می باشد.

پردازش سیگنال های آزمایش های دینامیکی

با توجه به نحوه آزمایش، پردازش اطلاعات مبتنی بر تکنیک های ارائه شده از نوع شناسایی سیستم از روی اندازه گیری خروجی^۲ می باشد که با اصطلاح شناخته می شود. بدین ترتیب، برای شناسایی سیستم، برای سیگنال های خروجی تابع چگالی طیفی متقاطع^۳ محاسبه شد [۲]. جهت حذف اثرات نویز، غیر مانا بودن فرآیند و اثرات دینامیکی دیزل، تنها ۱/۰۲۴ ثانیه از پاسخ سازه بعد از عبور آخرین محور دیزل مورد پردازش

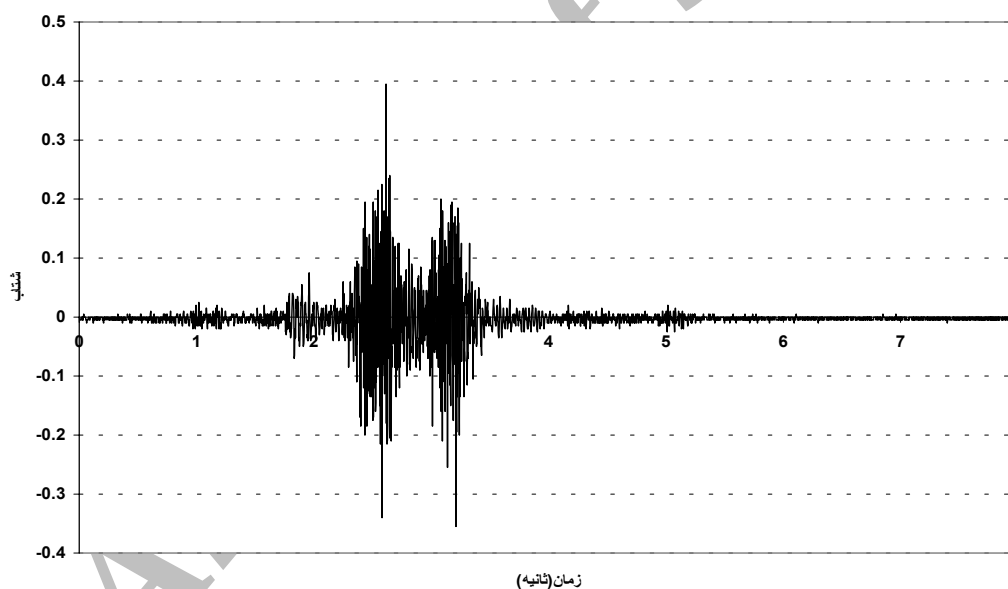
در آزمایش دینامیکی، دیزل ۶ محوره ۱۲۰ تنی با سرعت های مختلف از روی پل عبور داده شد. تعداد ۵ کانال اندازه گیری الکترونیکی برای ثبت شتاب و تغییرمکان بکار گرفته شد. دو کانال مربوط به شتاب سنج های قائم ۵g طرفین ترک کلید، دو کانال مربوط به تغییرمکان سنج های قائم طرفین ترک کلید و یک کانال مربوط به تغییرمکان سنج ثبت کننده تغییرات عرض ترک کلید قوس بود (شکل ۲).

داده برداری اطلاعات در تمام ۵ کانال فوق با سرعت ۵۰۰ هرتز و در دهانه میانی پل انجام گرفت و مجموعاً ۵۰ سیگنال با طول های ۸ الی ۲۰ ثانیه ضبط شد. دستگاه برداشت اطلاعات دینامیکی از نوع DRA-10A ساخت کارخانه TML بود. مشخصات سیگنال های ثبت شده در جدول (۲) ملاحظه می گردد. نمونه ای از منحنی های بدست آمده برای شتاب و تغییر مکان قائم در محل کلید، در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

در آزمایش های دینامیکی، فاصله زمانی بین دو پیک سیگنال های تغییرمکانی سازه برابر زمان لازم برای عبور محور به محور دو بوژی دیزل قلمداد شده و سرعت قطار از تقسیم فاصله محور به محور بوژی جلو و عقب دیزل

جدول ۲: مشخصات سیگنالهای ثبت شده آزمایش دینامیکی پل کیلومتر ۲۴.

ردیف	سرعت کیلومتر بر ساعت	فرکانس قرائت هرتز	زمان داده برداری ثانیه	تعداد کانال ثبت کننده داده ها	تعداد داده های برداشت شده
۱	۱۰/۳۵	۵۰۰	۲۰	۵	۱۰۰۰۰
۲	۱۹/۹۳	۵۰۰	۱۰	۵	۵۰۰۰
۳	۲۰/۶۳	۵۰۰	۱۴	۵	۷۰۰۰
۴	۳۵/۴۹	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۵	۵۵/۹۵	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۶	۴۷	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۷	۷۱/۷۴	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۸	۷۰/۱۶	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۹	۸۰/۰۲	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰
۱۰	۷۴/۲۳	۵۰۰	۸	۵	۴۰۰۰



شکل ۳: شتاب کلید پل اکبرآباد، حین عبور قطار با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت.

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] =$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt$$

(۱)

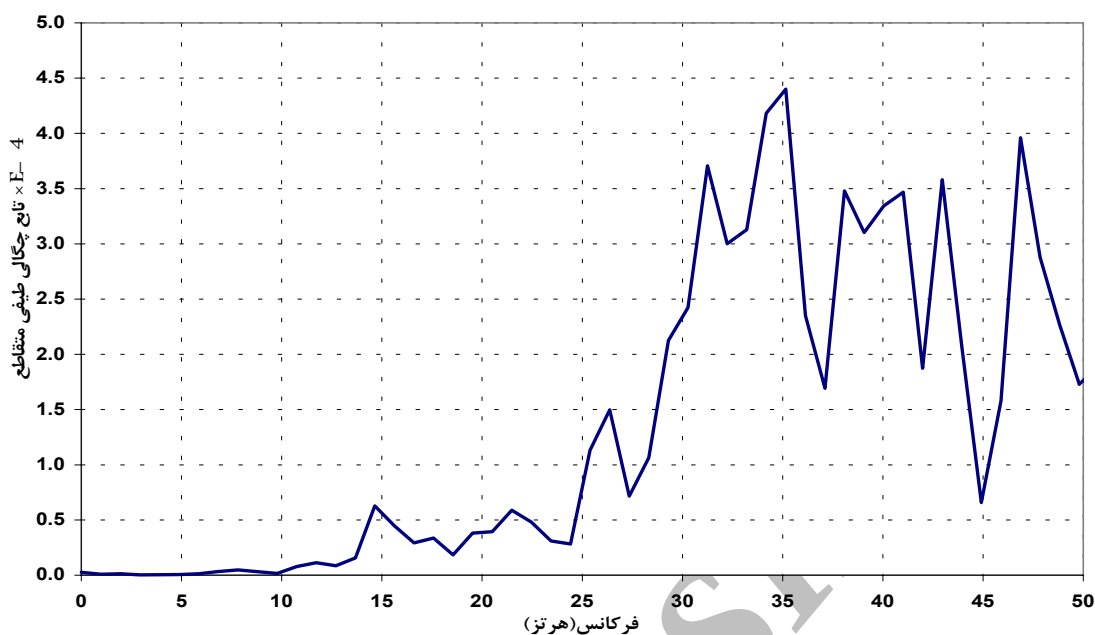
$$S_{XY}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \{X^*(f)Y(f)\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad j = \sqrt{-1}$$

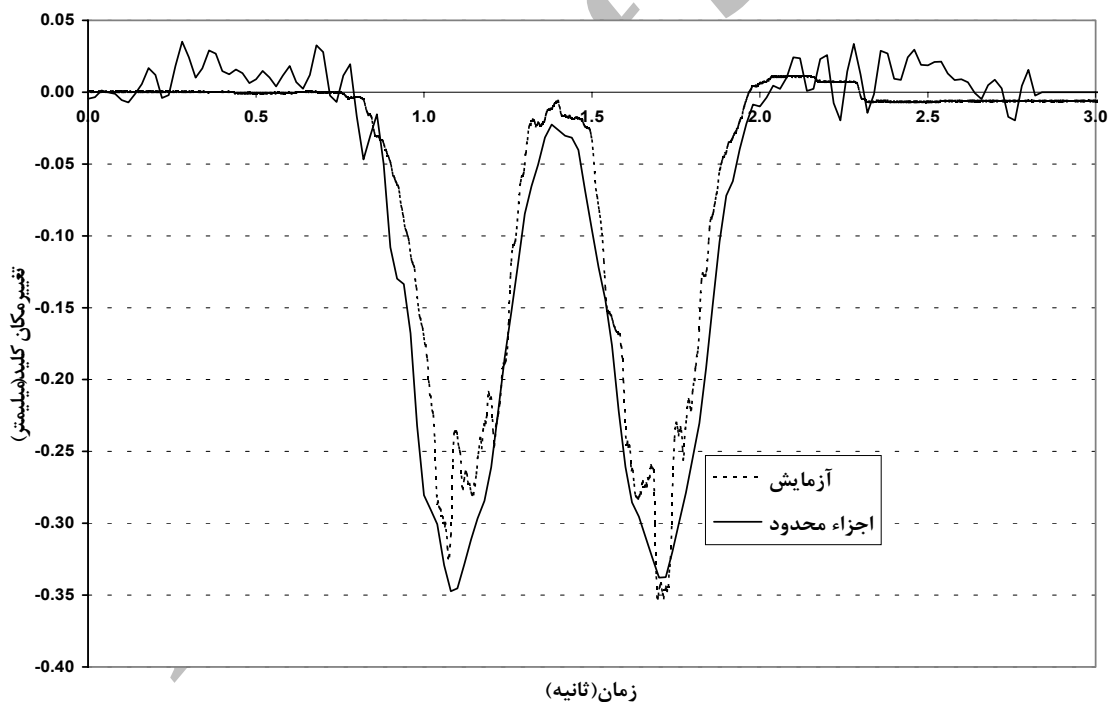
(۲)

قرار گرفته و میانگین نتایج حاصل از تمام آزمایش‌های دینامیکی، مبنای تعیین خصوصیات دینامیکی پل قرار گرفت.

با فرض مانا بودن، تابع چگالی طیفی متقاطع دو فرآیند $x(t)$ و $y(t)$ ، تابع دیگر ارتباطی^۴ آیندو فرآیند (رابطه ۱) در فضای فرکانسی می باشد (رابطه ۲).



شکل ۴: تغییر مکان عمودی کلید پل، حین عبور دیزل با سرعت اسمی ۸۰ کیلومتر بر ساعت و مقایسه آن با مدل اجزاء محدود.



شکل ۵: میانگین تابع چگالی طیفی متقاطع دو شتاب سنج قائم در آزمایشهای عبور دیزل.

هرتز با دقت فرکانسی ($\frac{500}{512} = 98 \text{ Hz}$) محاسبه شده است. تابع چگالی طیفی متقاطع دو شتاب سنج قائم طرفین ترک کلید در ۱۰ آزمایش دینامیکی مورد محاسبه قرار گرفت و از اندازه این تابع در هر فرکانس میانگین گیری بعمل آمد. در شکل (۵) میانگین اندازه تابع

جهت تسریع در پردازش اطلاعات و استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه سریع، تعداد نقاط پردازش شده از سیگنال برابر ($2^9 = 512$) انتخاب شد. با توجه به فرکانس قرائت ۵۰۰ هرتز، فرکانس ناپکوئیست ۲۵۰ هرتز است. لذا محتوای فرکانسی سیگنالهای دینامیکی تا فرکانس ۲۵۰

همانطور که ملاحظه می گردد، مقدار ضریب ضربه با افزایش سرعت بزرگ می شود. بطوریکه این مقدار از عدد یک در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت به حدود ۱/۳۵ در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت افزایش می یابد. از مقایسه ضریب ضربه بدست آمده از آزمایش (۱/۳۵) و ضریب ضربه ارائه شده توسط آیین نامه UIC (محدوده ۱/۶۷ تا ۲)، استنباط می شود که اعداد آیین نامه ای مقادیر محافظه کارانه ای دارند.

آزمایش استاتیکی

در آزمایش استاتیکی، پل به میزان ۵۰۰ تن تحت اثر بار گسترده واقع شد. بارگذاری مزبور در طول ۵ متر و در وسط دهانه میانی اعمال گردید. بارگذاری توسط بسته های ۴ تنی به ابعاد تقریبی ۶/۱۵×۱×۰/۲ متر که از ریلهای فرسوده راه آهن تهیه شده، انجام گرفت. بسته های ۴ تنی توسط جرثقیل ریلی به تدریج و طی سه روز بر روی پل قرار داده شد. جهت تضمین توزیع یکنواخت در بارگذاری گسترده، بسته ها در پنج سری و مجزای از هم و به فاصله ۱۰ سانتیمتری از یکدیگر چیده شدند و هر چند ردیف یکبار بوسیله تسمه هایی به یکدیگر جوش گردیدند (شکل ۶). تغییر مکانهای دهانه میانی پل، توسط ۹ تغییر مکان سنج الکترونیک، اندازه گیری شد. تغییر مکان سنج ها در محل کلید، نقاط $\frac{1}{4}$ قوس، پای قوس و روی پایه های دهانه میانی پل نصب شده بودند. شکل (۷) تغییر مکان عمودی پل در طرفین ترک کلید دهانه میانی را نشان می دهد.

چگالی طیفی متقاطع بازای فرکانسهای مختلف دیده می شود.

اتحادیه بین المللی راه آهن UIC رابطه (۳) را برای تعیین حدود فرکانس نخست پلهای راه آهن، پیشنهاد می کند [۶]. پارامتر I در رابطه (۳) مبین طول دهانه پل می باشد. که در اینجا برابر ۶ متر است.

$$f_1 \in [f_{low}, f_{up}]$$

$$f_{low} = \frac{80}{l} \quad 4 \leq l \leq 20 \text{ m}$$

$$= 23.58 \cdot l^{-.592} \quad 20 \leq l \leq 100 \text{ m}$$

$$f_{up} = 94.76 \cdot l^{-.748} \quad 4 \leq l \leq 100 \text{ m}$$

(۳)

براساس این رابطه، فرکانس اول پل اکبرآباد در بازه [۲۴/۸ و ۱۳/۳] هرتز قرار دارد. با توجه به پیشنهاد UIC و شکل (۵)، مد اول ارتعاشی این سازه ۱۴/۶ هرتز می باشد [۹].

محاسبه ضریب ضربه

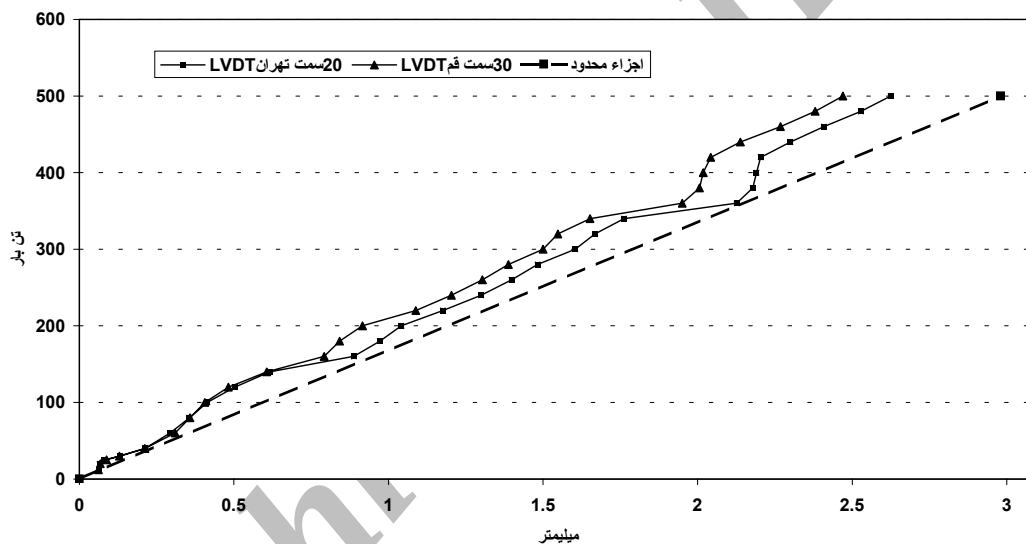
یکی از پارامترهای مهم در تحلیل و طراحی پلها، محاسبه ضریب ضربه می باشد. ضریب ضربه به عواملی چون اندازه دهانه آزاد، سیستم سازه ای، جنس مصالح، شرایط گیرداری، عمر و خستگی سازه، مشخصات بار، نحوه آزمایش و مبنای محاسبه بستگی دارد. ضریب ضربه را می توان بر مبنای تغییر مکان، کرنش و غیره محاسبه نمود. در جدول (۳) ضریب ضربه بر مبنای تغییر مکان قائم در طرفین ترک کلید قوس و تغییر عرض ترک محاسبه و با مقادیر آیین نامه ای مقایسه شده است.

جدول ۳: مقدار ضریب ضربه با توجه به آزمایش دینامیکی و آیین نامه UIC.

سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۱۰	۲۰	۳۵	۶۰	۷۰	۸۰
تغییر مکان قائم کلید سمت شرقی ترک	۱	۱/۰۷۴	۱/۰۷۱	۱/۱۵	۱/۲۴	۱/۳۵۳
تغییر مکان قائم کلید سمت غربی ترک	۱	۱/۰۳۳	۱/۱	۱/۱۶۷	۱/۱۰۱	۱/۱۱۷
تغییر عرض ترک در کلید	۱	۱/۰۱۴	۱/۰۹۶	۱/۰۶۸	۱/۰۸۹	۱/۲۱۹
آیین نامه UIC (لنگر خمشی)	۲	۲	۲	۲	۲	۲
آیین نامه UIC (نیروی برشی)	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷



شکل ۶: بارگذاری استاتیک پل بوسیلهٔ وزنه های مخنی ساخته شده از ریل های فرسوده .



شکل ۷: تغییر مکان عمودی کلید در آزمایش استاتیک و مقایسهٔ آن با مدل اجزاء محدود .

خط راست مبین سه روز بارگذاری است. با توجه به شکل (۷)، در طول شب، تغییر مکانها افزایش یافته است و با آغاز بارگذاری در صبح روز بعد، در ابتدا شیب منحنی قدری افزایش پیدا کرده و سپس منطبق با شیب منحنی روز قبل، ادامه پیدا کرده است. بدین ترتیب می توان رفتار کلی سازه تا بار ۵۰۰ تن را خطی قلمداد نمود و وجود دندانها را به توقف بارگذاری در شب نسبت داد. مشاهدات میدانی نیز اثری از تخریب مهم، ترک آشکار و یا نشست قابل توجه، نشان نداد. بدین ترتیب و با توجه به سطح پایین تنشها در مقاطع سازه، می توان فرض کرد که سازه در طول آزمایش، رفتاری خطی و الاستیک داشته

بطوریکه در شکل (۷) دیده می شود، تغییر شکلهای قائم ثبت شده در طرفین ترک کلید به هم نزدیک می باشند. نزدیکی دو منحنی حاکی از اختلاف ناچیز تغییر مکان قائم در طرفین ترک بوده و عدم تقارن اندکی را در رفتار پل نشان می دهد. وجود تقارن در سازه و در بارگذاری استاتیک مؤید این رفتار است. با دقت در منحنی های بدست آمده از آزمایش استاتیک در شکل (۷) ملاحظه می شود که منحنی بار-تغییر شکل را می توان با سه پاره خط راست و دو دندان بین این خطوط تقریب زد. این دو دندان منطبق بر دو شب از دوران بارگذاری می باشد که عملیات بارگذاری در طول این دو شب متوقف بود و سه

این عمل، از طریق تغییر مداوم خواص مصالح المانها تا رسیدن به هماهنگی میان نتایج مدل و آزمایش بوده است و از این عمل تحت عنوان بهنگام سازی مدل اجزاء محدود یاد می گردد. مراحل بهنگام سازی مدل اجزاء محدود در شکل (۹) آورده شده است. برای بهنگام سازی، دو نرم افزار ANSYS 5.4 و MATLAB 5.3 بطور همزمان، به خدمت گرفته شد. به این ترتیب که از قابلیت اجرای فرامین DOS در محیط برنامه نویسی MATLAB 5.3 استفاده شده و نرم افزار ANSYS 5.4 در مد Batch File اجرا گشته است. در پل مورد آزمایش، تغییر مکان عمودی کلید بعنوان معیاری جهت کالیبراسیون مدل عددی، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین سختی مصالح، پارامتر تطبیقی مدل منظور گشته، بدین ترتیب که در قدم نخست، مقادیری برای سختی مصالح اعضای اصلی و فرعی، یعنی قوس، دیوار جانبی، پرکننده ها، تکیه گاهها و خاک بستر، فرض شده است.

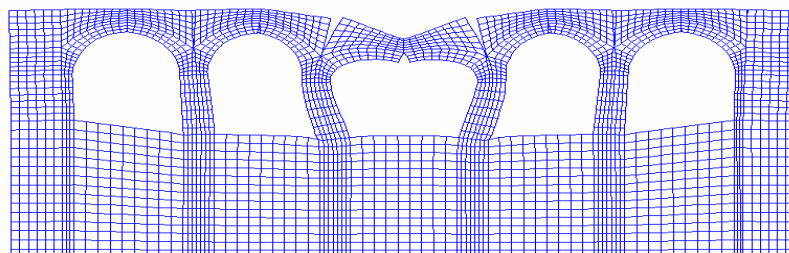
هدف این بوده است که این پارامترها بگونه ای برگزیده گردند، که معیار کالیبراسیون (تغییر مکان عمودی کلید) در آزمایش و مدل عددی مشابه شوند. بدین ترتیب علاوه بر خواص مصالح، اثر خصوصیات دیگری نظیر ترکها، تغییر خواص مصالح در مقاطع مختلف اعضا، عدم قطعیت های اجرایی، آثار خستگی و غیره بصورت غیرمستقیم در سختی مصالح منعکس می شوند. از اینرو مقادیر بهنگام شده سختی مصالح، با خواص واقعی مصالح انطباق کامل ندارد.

جهت تحلیل دینامیک، دیزل به مثابه نیروی متحرک^۵ تلقی شده و از اثر اینرسی جرم دیزل صرف نظر گردید. بنابراین ۶ محور دیزل بصورت نیروی متمرکز با فاصله مشخص و با سرعت محاسبه شده از آزمایش، یعنی ۰/۲/۸۰ کیلومتر بر ساعت در گامهای زمانی ۰/۲ ثانیه (فرکانس ۵۰ هرتز) از روی پل عبور داده شد و در مجموع در ۱۸۱ گام بارگذاری تحلیل دینامیکی انجام گردید. بطور مشابه برای تحلیل دینامیکی با سرعت ۱۰/۳۵ کیلومتر بر ساعت، تحلیل در گامهای زمانی ۰/۲ ثانیه (فرکانس ۵ هرتز) انجام پذیرفت. شکل (۱۰) شبیه سازی بارگذاری دیزل را بصورت نیروی متحرک نشان می دهد.

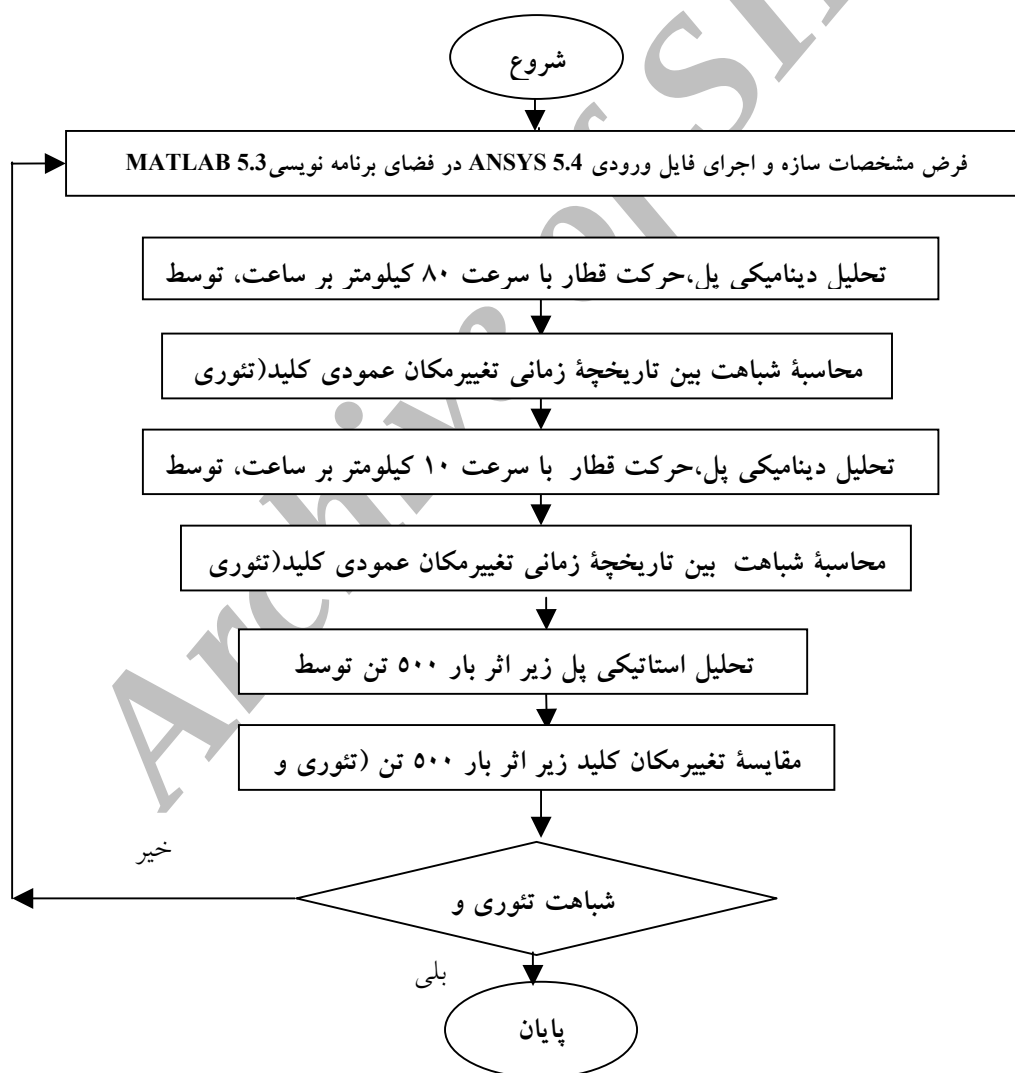
است [۹]. همچنین شکل (۷) نشان می دهد که مقدار تغییر شکل بازای بار ۵۰۰ تن در حدود ۲/۷ میلیمتر می باشد. این تغییر شکل نسبتا کوچک، نشاندهنده سختی و صلبیت بزرگ سازه در باربری قائم می باشد. مقایسه بار وارد شده با حداکثر بار سرویس (۶۰ تن بازای یک بوژی دیزل ۱۲۰ تنی)، وجود ظرفیت ذخیره نسبتا بزرگی را به اثبات می رساند. این شواهد نشان می دهد که وجود ترک تمام عمق و نسبتا ضخیم در محل کلید قوس های پل، سختی قائم سازه و عملکرد آن را در بارهای سرویس به مخاطره نمی اندازد و پل می تواند با حاشیه ایمنی کافی تحت بارهای موجود، به کاربری خود ادامه دهد.

مدلسازی اجزاء محدود و بهنگام سازی آن با نتایج آزمایش

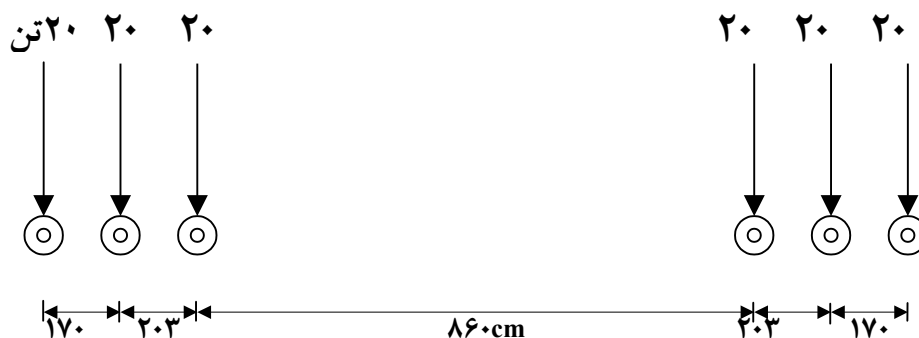
مدلسازی اجزاء محدود پل اکبر آباد دو بعدی واز نوع کرنش مسطح در نظر گرفته شد (شکل ۸) و برای خاک، قوس، پر کننده ها و بالاست خواص جداگانه منظور گردید. خاک و قوس با المان چهار گرهی - که در نرم افزار ANSYS 5.4 با نام PLANE42 مشخص می شود و مصالح پرکننده و بالاست با المان هشت گرهی - که در نرم افزار ANSYS 5.4 با نام PLANE82 مشخص می گردد- در نظر گرفته شد. خاک تا عمق ده متری و پل مطابق نقشه مدلسازی گردید. از آنجاییکه در کلید تمام دهانه ها، ترک وجود داشت و زیر اثر بارگذاری مزبور ترک ها بسته نشد، ترک مزبور در کلید هر پنج دهانه بصورت فضای خالی در نظر گرفته شد. درز اجرایی موجود بین ۵ دهانه پل نیز بصورت فضای خالی منظور گردید. نحوه رفتار واقعی سازه به شرایط گیرداری تکیه گاهها، خواص واقعی مصالح، تغییر خواص در مقاطع مختلف، اثر تغییر درجه حرارت، تغییر خواص در طول زمان، اثر خستگی، اندازه و موقعیت ترکها و غیره بستگی دارد. در عمل، احصاء تمامی این ویژگیها بصورت دقیق، نامقدور است. از این رو به ناچار اثر عوامل فوق بصورت غیر مستقیم وارد مدلسازی می شود. به این صورت که پارامترهای مدل اجزاء محدود تغییر داده می شود تا اینکه نتایج آزمایش و مدل اجزاء محدود شبیه هم شوند. انجام



شکل ۸: مدل اجزاء محدود دوبعدی (کرنش مسطح) پل اکبرآباد زیر اثر بار گسترده ۵۰۰ تن.



شکل ۹: نحوه بهنگام کردن مدل اجزاء محدود به کمک نتایج آزمایش استاتیکی و دینامیکی.



شکل ۱۰: شبیه سازی بار دیزل ۱۲۰ تنی ۶ محوره به صورت شش بار متحرک.

آن نسبت به بار استاندارد تعیین می شود. ضریب ارزیابی بطور ساده عبارتست از حاصل تقسیم ظرفیت موجود مقطع پس از کسر ظرفیت بار مرده به نیروهای داخلی ضریبدار ناشی از بار زنده و ضربه. البته این تعریف طبق روش ضریب بار می باشد. در روش تنش مجاز، ضریب ارزیابی بصورت نسبت تنش مجاز مربوط به بار زنده به تنش حاصل از بارگذاری زنده و ضربه، تعریف می شود. از آنجاییکه ضریب ضربه دربردارنده حاشیه اطمینان برای بار مجاز می باشد، لازم است که این ضریب بر اساس ضوابط استاندارد تعیین شود. برای ارزیابی پلهای راه آهن دو استاندارد UIC [۹] و AREMA [۱۰] و برای ارزیابی پلهای راه، استاندارد AASHTO به عنوان مراجع معتبر شناخته می شوند. مطابق استاندارد UIC (۱۹۹۴)، طراحی به هر دو روش تنش مجاز و ضریب بار و مقاومت امکان پذیر است. ضریب ارزیابی پل کوچکترین ضریب بدست آمده برای اعضای مختلف است. ضریب ارزیابی اعضای پل، برای بحرانی ترین نیروی داخلی محاسبه می شود. ضریب ارزیابی به روش تنش مجاز طبق رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$RF = \frac{\sigma_{all} - \sigma_{DL}}{\delta \cdot \sigma_{LL}}$$

(۴)

که در آن :

σ_{all} = تنش مجاز مصالح

σ_{DL} = تنش بار مرده با استفاده از مدل بهنگام شده

δ = ضریب ضربه واقعی

پس از تحلیل دینامیکی پل زیر اثر حرکت دیزل با سرعت ۸۰/۰۲ کیلومتر بر ساعت و تحلیل استاتیکی پل تحت بارگذاری گسترده ۵۰۰ تنی، تغییرمکان کلید قوس در تحلیل استاتیکی و دینامیکی به عنوان خروجی نرم افزار ANSYS 5.4 وارد نرم افزار MATLAB 5.3 شد و نهایتاً میزان شباهت تاریخیچه زمانی تغییرمکان قائم کلید قوس در تحلیل دینامیک و تغییرمکان قائم کلید قوس در تحلیل استاتیک، محاسبه شده و در فایلی ذخیره گردید و با توجه به میزان شباهت نسبت به تغییر سختی مصالح برای گام بعدی تصمیم گیری شد. شکل (۱۱) تغییر مکانهای عمودی زیر اثر بارگذاری استاتیک ۵۰۰ تنی گسترده در دهانه میانی پل را نشان می دهد.

پارامترهای تطبیقی مدل، پس از حدود ۳۰۰ بار تکرار مراحل یاد شده، مطابق جدول (۴) بدست آمده است. هماهنگی نتایج آزمایش با مدل بهنگام شده در شکل‌های (۴) و (۷) مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد هماهنگی مناسبی بین نتایج تئوری و آزمایش وجود دارد. شباهت بین مدل و نتایج آزمایشهای دینامیکی و استاتیکی، این اطمینان خاطر را بوجود می آورد که مدل عددی را می توان برای ارزیابی سایر خصوصیات پل که مورد آزمایش قرار نگرفته است، بکار برد. به عنوان مثال می توان بارگذاری استاندارد قطار در آیین نامه UIC را بر مدل عددی وارد کرد و ضریب ارزیابی پل را، تعیین نمود [۹].

تعیین ضریب ارزیابی پل

ظرفیت باربری یک پل با تعیین ضریب ارزیابی

حالت‌های مختلف بارگذاری در نظر گرفته شد تا بحرانی ترین الگوی بارگذاری بدست آید. نتایج تنش کششی و فشاری در دو مقطع کلید و پاتاق در جدول (۵) و حداکثر تغییرشکل مربوط به کلید در حالت‌های مختلف بارگذاری در جدول (۶) نشان داده شده است

σ_{LL} = تنش بار زنده استاندارد با استفاده از مدل بهنگام شده

RF = ضریب ارزیابی

برای تعیین ظرفیت باربری پل لازم است که از بارگذاری استاندارد استفاده شود. با اعمال بار استاندارد ۲۵ تن UIC بر روی مدل بهنگام شده، آنالیز سازه انجام پذیرفت و

جدول ۴: پارامترهای تطبیقی مدل پل اکبرآباد پس از بهنگام نمودن با نتایج آزمایش.

وزن مخصوص (تن بر مترمکعب)	میرایی (درصد)	ضریب پواسن	ضریب ارتجاعی (مگاپاسکال)	
۲/۴	۲۰	۰/۲	۷۳۵۰	قوس
۲/۲	۲۰	۰/۲	۶۳۰۰	پرکننده ها
۱/۸	۲۰	۰/۲	۲۱۰۰	خاک
۱/۸	۲۰	۰	۲۱۰۰	بالاست

جدول ۵: مقادیر تنش در مقاطع مختلف در مدل بهنگام شده ($\frac{Kg}{cm^2}$).

مقطع پاتاق		مقطع کلید		بارگذاری
تنش کششی	تنش فشاری	تنش کششی	تنش فشاری	
۰/۳۸	۰/۸۱	۰/۰۹	۱/۱۵	بارمرده
۱/۶۶	۵/۱۷	۱۸/۶۱	۱۹/۷۷	بار ۵۰۰ تن گسترده در دهانه میانی
۰/۴۹	۰/۵۷	۱/۳۱	۱/۳۵	دیزل ۶محوره ۱۲۰ تنی با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت
۰/۱۱	۰/۷۵	۲/۴	۳/۰۱	بار استاندارد ۲۵ تن UIC
۲/۰۴	۵/۹۸	۱۸/۶۹	۲۰/۹۲	بار مرده+۵۰۰ تن بارگسترده

$$f_c = .4 \times f'_c = .4 \times 240 = 96 \frac{Kg}{cm^2} \quad (4)$$

$$f_t = .4 \times \sqrt{f'_c} = .4 \times \sqrt{240} = 6.5 \frac{Kg}{cm^2} \quad (5)$$

با توجه به جدول (۵) بحرانی ترین مقطع پل در بارگذاری استاندارد آیین نامه، مقطع کلید پل می باشد. لذا با توجه به تنش های مجاز و ضریب ضربه محاسبه شده (۱/۳۵) و رابطه (۳)، ضریب ارزیابی پل با کنترل تنش فشاری برابر ۲۳/۳ (رابطه ۶) و با کنترل تنش کششی برابر ۲ (رابطه ۷) خواهد بود.

$$RF = \frac{96 - 1.15}{1.35 \times 3.01} = 23.3 \quad (6)$$

جدول ۶: تغییرمکان کلید در مدل بهنگام شده (میلیمتر).

۲/۹۸	بار ۵۰۰ تن گسترده در دهانه میانی
۰/۳۵	دیزل ۶محوره ۱۲۰ تنی با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت
۰/۵۲	بار استاندارد ۲۵ تن UIC
۰/۷۳	بار استاندارد ۲۵ تن UIC+ضریب ضربه واقعی

با توجه به ضوابط UIC (۱۹۹۴) و آشتو، تنش مجاز فشاری و کششی بتن از روابط (۴) و (۵) محاسبه می شوند. در صورتیکه مقاومت مشخصه بتن ۲۴۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع در نظر گرفته شود، مقاومت فشاری مجاز بتن ۹۶ و مقاومت کششی مجاز آن ۶/۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع خواهد بود.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، گزارشی از آزمایش تمام مقیاس پل اکبرآباد برای ارزیابی ظرفیت باربری باقیمانده آن ارائه گردید. در این آزمایش، پل قوسی بتنی وزنی تحت بارگذاری استاتیک و دینامیک قرار گرفت. رفتار پل تا بارگذاری استاتیک ۵۰۰ تن، بصورت خطی و الاستیک باقی ماند و نشان داد که پل از سختی و مقاومت ذخیره نسبتاً زیادی در مقایسه با بار سرویس برخوردار است. بخش مهمی از مقاله، به نحوه مدلسازی عددی و بهنگام نمودن آن با نتایج آزمایشهای دینامیکی و استاتیکی اختصاص یافت. در مدلسازی عددی، هم نتایج آزمایش دینامیکی و هم نتایج آزمایش استاتیکی، مورد استفاده قرار گرفت و نهایتاً مدل بدست آمده، شباهت رضایتبخشی با نتایج آزمایشهای میدانی پیدا کرد. مطالعات انجام شده، الگوی مناسبی برای تحلیل آزمایشهای میدانی ارائه نمود. با عنایت به نادر بودن آزمایشهای میدانی بر روی پلهای قوسی بتنی، نتایج آزمایش حاضر، اطلاعات ارزشمندی در مورد اینگونه پلها ارائه می کند. نتایج بدست آمده در مجموع نشان دهنده ظرفیت بالای اینگونه پلها در بارگذاری قطار بوده و سیستم سازه ای مذکور را به عنوان یک سیستم قابل اعتماد معرفی می کند.

تشکر و قدردانی

نهادهای همکار برای آزمایشهای استاتیک و دینامیک پل اکبرآباد، مرکز تحقیقات راه آهن، معاونت پژوهشی دانشکده فنی دانشگاه تهران و مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن می باشند. بدینوسیله از کلیه این نهادها، بویژه مرکز تحقیقات راه آهن، که هزینه آزمایش ها را متقبل گردید، تشکر و قدردانی می گردد.

$$RF = \frac{6.5 - .09}{1.35 \times 2.4} = 2.0$$

(۷)

نظر به اینکه خیز مجاز این پل مطابق آیین نامه UIC معادل $\frac{1}{800}$ دهانه یعنی $\frac{6000}{800} = .75$ میلیمتر می باشد و با توجه به جدول (۶)، ضریب ارزیابی پل بر اساس خیز که حاصل تقسیم خیز مجاز بر خیز ناشی از بار استاندارد آیین نامه به همراه ضربه می باشد، برابر $\frac{7.5}{1.35 \times .52} = 10.7$ می باشد.

آزمایشهای انجام شده در این پروژه نشان داد که افزایش تنشهای کششی و حتی ایجاد ترک خوردگی عمیق در مقاطع بحرانی سازه باعث کاهش ظرفیت باربری پل نمی گردد بلکه مکانیزم باربری سازه متناسب با ترک خوردگی تغییر می کند. بدین معنی که مقادیر لنگر و بزرگی تنشها در محل ترکها کاهش یافته و باز توزیع نیروها باعث افزایش تنش ها در سایر نقاط می گردد. این واقعیت ناشی از سیستم قوسی شکل سازه بوده و نشان می دهد که جریان فشاری تنشها حاکم بر رفتار سازه می باشد. بر این اساس پارامترهای اصلی حاکم بر مقاومت را می توان به تنش فشاری و خیز نسبت داد. بدین ترتیب استفاده از معیار تنش کششی برای ارزیابی این پل باعث نادیده انگاشتن ظرفیت باربری نسبتاً زیاد پل می باشد. حال با توجه به دو معیار تنش فشاری و حداکثر خیز، ضریب ارزیابی کوچکتر حاکم خواهد بود. بنابراین ضریب ارزیابی پل برای بار محوری ۲۵ تن UIC، کوچکترین ضریب یعنی ۱۰/۷ خواهد بود. این بدان معناست که پل طاقی به دهانه ۶ متر از استحکام بسیار بیشتر از حد نیاز برخوردار است و با وجود گذشت بیش از ۶۰ سال از عمر سازه، پاسخگوی بارهایی به مراتب بزرگتر از بار استاندارد می باشد.

مراجع

- 1 - Sowden, A. M. (1990). *The maintenance of brick and stone masonry structures*. E. & F. N. Spon, first edition.
- 2 - Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. John Wiley & Sons, second edition.

- 3 - McConnell, K. G. (1995). *Vibration testing; theory and practice*. John Wiley & Sons, first edition.
 - 4 - Narayanan, R. and Roberts, T. M. (1991). *Structurs subjected to dynamic loading; stability and strength*. Elsevier Science Publishers LTD, first edition.
 - 5 - Boswel, L. F. and D'Mello, C. (1993). *The dynamics of structural systems*. Blackwell Scientific Publications, first edition.
 - 6 - Fryba, L. (1996). *Dynamics of railway bridges*. Thomas Telford, first edition.
 - 7 - *Signal Processing Toolbox for use with MATLAB*. (1999). MATH Works Inc., version 4.2.
 - 8 - Kohnke, P. (1994). *ANSYS analysis guides*. SAS IP Inc., seventh edition.
 - 9 - UIC 776-1 (1994). *Loads to be considered in railway bridge design*. 4th edition.
 - 10 - *AREMA Manual for Railway Engineering*, (1996). Part 19, American Railway Association.
- ۱۱- معرفت، م. ص. "آزمایش بارگذاری پل‌های قوسی بتنی راه آهن." گروه خط و ابنیه مرکز تحقیقات راه آهن جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۷۹).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Mass-Concrete Arch Bridge
- 2 - Structural Identification From Output Measurements
- 3 - Cross-Spectral Density
- 4 - Cross Correlation
- 5 - Moving Force