



INSO

جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

20502

سازمان ملی استاندارد ایران

1st.Edition

Iranian National Standardization Organization

2016

۲۰۵۰۲

چاپ اول

۱۳۹۴

ارتعاش مکانیکی - ارزشیابی نتایج  
اندازه‌گیری آزمون‌های دینامیکی و رسیدگی  
به پل‌ها

**Mechanical vibration — Evaluation of  
measurement results from dynamic tests  
and investigations on bridges**

**ICS: 17.160**

**سازمان ملی استاندارد ایران**

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران - ایران

تلفن: ۸۸۸۷۹۴۶۱-۵

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج ، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: (۰۲۶) ۳۲۸۰۶۰۳۱ - ۸

دورنگار: (۰۲۶) ۳۲۸۰۸۱۱۴

رایانمۀ: standard@isiri.org.ir

وبگاه: <http://www.isiri.org>

**Iranian National Standardization Organization (INSO)**

No.1294 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.org.ir

Website: <http://www.isiri.org>

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است. تدوین استاندارد در دامنه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان ، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادر کنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیته ملی مرتبط با آن رشتہ طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب ، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین المللی الکترونیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و / یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرگانی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل اندازه گیری، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزشیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها ناظر است. ترویج دستگاه بین المللی یکaha، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل اندازه گیری، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

"ارتعاش مکانیکی - ارزشیابی نتایج اندازه‌گیری آزمون‌های دینامیکی و رسیدگی به پل‌ها"

### سمت و / یا نمایندگی

شرکت رایان اسکان خودرو

رئیس:

طهوری اصل، توحید

(کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک)

### دبیر:

اداره کل استاندارد آذربایجان شرقی

ابراهیمی، سهیلا

(کارشناسی فیزیک)

### اعضا: (اسمی به ترتیب حروف الفبا)

شرکت توران عمران سازان

آبیاری، رعناء

(کارشناسی ارشد مهندسی عمران)

اداره کل مرکز تحقیقات راه مسکن شهرسازی

آسایش، محمد صادق

(کارشناسی ارشد مهندسی سازه)

شرکت توران عمران سازان

آبرملو، آرزو

(کارشناسی ارشد مهندسی عمران)

اداره کل استاندارد آذربایجان شرقی

ارشد، بهمن

(کارشناس ارشد مهندسی عمران)

شرکت آذر سیوان پارسیان

تقی‌پور صفایی، رویا

(کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)

ازمايشگاه فنی مکانیک خاک

تقی‌زادیه، نادر

(کارشناسی ارشد زمین شناسی)

اداره کل استاندارد آذربایجان شرقی

حنیفی، محمد باقر

(کارشناسی مهندسی مکانیک)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

رام بزرگ، فرامرز

(دکتری مهندسی مکانیک)

رضوی، رخساره  
(کارشناسی فیزیک)

سازمان ملی استاندارد ایران

روا، افشین  
(کارشناسی ارشد مهندسی عمران)

اداره کل استاندارد آذربایجان شرقی

صحتی، مهدی  
(کارشناسی مهندسی عمران)

شرکت راه و ساختمان نفت و پتروشیمی ایران

عسگری خواه، وحید  
(کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)

اداره پیمان و رسیدگی اداره کل راه و شهرسازی

فغفوری، جعفر  
(کارشناسی مهندسی عمران)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد هریس

کلیبری، بهراد  
(کارشناسی ارشد فیزیک)

شرکت حديد سازه پیشرو

مظلوم بشیری، هادی  
(کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)

## فهرست مندرجات

صفحه		عنوان
ج		آشنایی با سازمان ملی استاندارد
ز		کمیسیون فنی تدوین استاندارد
ط		پیش گفتار
۱	هدف و دامنه کاربرد	۱
۲	مراجع الزامی	۲
۲	اصطلاحات و تعاریف	۳
۳	اندازه‌گیری ارتعاش	۴
۳	ملاحظات کلی	۱-۴
۳	پایش یک پل حین ساخت و آماده برای راه اندازی	۲-۴
۳	اهداف پایش ارتعاش	۱-۲-۴
۶	ارزشیابی مدیریت ساخت	۲-۲-۴
۶	کلیات	۱-۲-۲-۴
۶	ارزشیابی کشش کابل	۲-۲-۲-۴
۶	ارزشیابی قابلیت ساخت سازه	۳-۲-۲-۴
۶	مشخصه‌های ارزشیابی کارآیی سازه	۳-۲-۴
۶	کلیات	۱-۳-۲-۴
۶	بسامدهای طبیعی و شکل‌های مد	۲-۳-۲-۴
۷	میرایی	۳-۳-۲-۴
۷	ویژگی‌های پاسخ دینامیکی یک سازه با واسطه‌های پیرامون	۴-۳-۲-۴
۸	تابش امواج صوتی پیرامون یا از میان سازه	۵-۳-۲-۴
۸	ارزشیابی ایمنی حین ساخت و پس از تکمیل آن	۴-۲-۴
۸	تائید طرح برای کارآیی زمین لرزه	۱-۴-۲-۴
۹	تائید طرح برای باد	۲-۴-۲-۴
۹	تائید طرح خستگی	۳-۴-۲-۴
۹	تعمیرپذیری پل تکمیل شده	۵-۲-۴
۱۰	ارزشیابی سازگاری محیطی پل تکمیلی شده	۶-۲-۴
۱۰	تعیین مشخصه‌های ارتعاش اولیه یک پل تکمیل شده	۷-۲-۴
۱۰	بازخورد نسبت به کارآیی	۸-۲-۴
۱۰	پایش بر یک پل در حال تعمیر	۳-۴
۱۱	تحلیل داده و روش شناسایی ساختاری	۵

۱۱	کلیات	۱ - ۵
۱۱	تحلیل داده و دامنه	۲ - ۵
۱۱	دیجیتالی کردن	۳ - ۵
۱۲	شناسایی مشخصه‌های ارتعاش در دامنه زمانی	۴ - ۵
۱۲	کلیات	۱ - ۴ - ۵
۱۲	استخراج مولفه‌های بسامد طبیعی منفرد	۲ - ۴ - ۵
۱۲	بسامد طبیعی	۳ - ۴ - ۵
۱۳	مد بسامد طبیعی	۴ - ۴ - ۵
۱۳	میرایی	۵ - ۴ - ۵
۱۴	شناسایی مشخصه‌های ارتعاش با مدهایی با گستردگی نزدیک به هم	۶ - ۴ - ۵
۱۴	فن کاهش تصادفی (روش RD)	۷ - ۴ - ۵
۱۴	مشخصه‌های ارتعاش در دامنه بسامدی	۵ - ۵
۱۵	شناسایی ساختاری و تحلیل معکوس	۶ - ۵
۱۶	مدل‌سازی پل‌ها و محیط پیرامون آن‌ها	۶
۱۶	مدل‌سازی سازه‌های پل	۱ - ۶
۱۸	مدل‌سازی بارهای ترافیکی	۲ - ۶
۱۸	مدل‌سازی وسایل نقلیه	۱ - ۲ - ۶
۱۸	ناهمواری سطح	۲ - ۲ - ۶
۱۸	مدل‌سازی راه رفتن انسان و اثر دینامیکی آن	۳ - ۶
۱۹	بار باد	۴ - ۶
۱۹	مدل‌سازی زمین برای ارتعاش پل دره‌گذر	۵ - ۶
۱۹	ارزشیابی داده‌های پایش شده و کاربرد آن	۷
۱۹	روش ارزشیابی و معیارهای ارزشیابی	۱ - ۷
۱۹	طبقه‌بندی ارزشیابی	۱ - ۱ - ۷
۲۰	عوامل در نظر گرفته شده ارزشیابی	۲ - ۱ - ۷
۲۱	ارزشیابی حین ساخت	۲ - ۷
۲۱	ارزشیابی ایمنی ساختاری در پل‌های در دست تعمیر	۳ - ۷
۲۱	ارزشیابی خسارت	۱ - ۳ - ۷
۲۱	تأثیر اثرات بهسازی	۲ - ۳ - ۷
۲۱	ارزشیابی ایمنی یک پل آسیب دیده	۳ - ۳ - ۷
۲۲	ارزشیابی شرایط خستگی	۴ - ۳ - ۷
۲۲	ایمنی مداوم قطارها روی ریل‌ها	۵ - ۳ - ۷
۲۲	ارزشیابی تعمیرپذیری	۴ - ۷

۲۲	ارزشیابی تعمیرپذیری یک پل بزرگراه	۱ - ۴ - ۷
۲۲	ارزشیابی تعمیرپذیری پل راه آهن	۲ - ۴ - ۷
۲۳	ارزشیابی تعمیرپذیری یک پل عابر پیاده	۳ - ۴ - ۷
۲۳	ارزشیابی ارتعاشی محیط	۵ - ۷
۲۴	پیوست الف (اطلاعاتی) تحلیل داده‌ها در دامنه‌های زمانی و بسامدی	
۲۸	پیوست ب (اطلاعاتی) شناسایی مشخصه‌های ارتعاش	
۲۹	پیوست پ (اطلاعاتی) مدل‌سازی بار پیاده روی	

## پیش‌گفتار

استاندارد "ارتعاش مکانیکی- ارزشیابی<sup>۱</sup> نتایج اندازه‌گیری آزمون‌های دینامیکی و رسیدگی به پل‌ها" که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوطه توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده است و در ۹۴/۱۲/۶ دویست و هشتاد و چهارمین اجلاسیه کمیته ملی استاندارد اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌ها مورخ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در موقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO 18649: 2004, Mechanical vibration – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges

---

1-Evaluation

# ارتعاش مکانیکی - ارزشیابی نتایج اندازه‌گیری آزمون‌های دینامیکی و رسیدگی به پل‌ها

## ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روش‌شناسی<sup>۱</sup> برای ارزشیابی نتایج آزمون‌های دینامیکی و رسیدگی به پل‌ها و پل‌های درّه‌گذر<sup>۲</sup> است. این استاندارد، رویه اجرایی برای آزمون‌های هدایت کننده تشکیل می‌کند، به صورتی که در استاندارد ISO14963 ارائه شده است:

- اهداف آزمون‌های دینامیکی،
- فنون تحلیل داده‌ها و شناسایی سیستم،
- مدل سازی پل، و
- ارزشیابی داده‌های اندازه‌گیری شده.

یادآوری ۱- ارزشیابی می‌تواند به تعریف همه مشخصه‌های دینامیکی هر مد ارتعاشی امتحان شده، یعنی بسامد، سفتی<sup>۳</sup>، شکل مد، میرایی<sup>۴</sup> و ارتعاش غیرخطی آن‌ها با دامنه حرکت به‌پردازد. این‌ها می‌توانند اطلاعاتی در مورد مشخصه‌های دینامیکی یک سازه برای مقایسه با موارد پذیرفته شده در مورد طرح و یا به عنوان پایه‌ای برای پایش شرایط یا شناسایی سیستم فراهم کند. آزمون‌های دینامیکی مورد نظر در این استاندارد جایگزین آزمون‌های ایستا نمی‌شوند.

این استاندارد راهنمایی درباره ارزشیابی اندازه‌گیری های انجام شده در چرخه عمر پل‌ها ارائه می‌دهد. مراحل چرخه عمر مورد نظر عبارتند از:

- الف- حین ساخت و قبل از راهاندازی،
- ب- حین آزمایشات راهاندازی،
- پ- حین دوره‌های مشخصی در تمام طول عمر پل، و
- ت- بلافارسله قبل از خارج شدن پل از رده.

این استاندارد در مورد جاده، ریل و پل‌های عابرپیاده و پل‌های درّه‌گذر (هم حین ساخت و هم در طول عملکرد پل) و همچنین در موارد کارهای دیگر کاربرد دارد به شرط این که استفاده از آن‌ها مناسب باشد. کاربرد این استاندارد، در سازه‌های مشخص (پل‌های مهارشده با کابل<sup>۵</sup> یا پل‌های معلق<sup>۶</sup>) مستلزم آزمون‌های خاصی است که از مشخصه‌های خاص کار در آن‌ها می‌باشد.

1- Methodology

2 - Viaduct

3 - Stiffness

4 - Damping

5 - Cable- stayed bridges

6- Suspension bridges

**یادآوری ۲**- در تمام این استاندارد، «پل‌ها و پلهای دره‌گذر» «پل» نامیده می‌شوند. اصطلاح «دره گذر» فقط وقتی استفاده می‌شود که تفکیک بین این دو ضروری باشد.

## ۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است.  
بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

۱- استاندارد ملی ایران شماره ۴۰۱۹،**شوك و ارتعاش مکانيكى،پايش وضعیت-واژه‌نامه**

2-2 ISO 14963, Mechanical vibration and shock- Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts

2-3 ISO 14964, Mechanical vibration and shock- Vibration of stationary structures - Specific requirements for quality management in measurement and evaluation of vibration

## ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف تعیین شده در استاندارد ملی ایران شماره ۴۰۱۹ ، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می‌روند:

۱-۳

**قابلیت ساخت**

خاصیت یک سازه که باعث می‌شود ساخت آن به صورت ایمن، بهموقع و اقتصادی پیش برود.

**یادآوری**- قابلیت ساخت پل‌ها ممکن است ساخت آن را برای کارکردن در شرایط بادی شدید داشته باشد، بنابراین اثرات باد بر ارتعاش می‌تواند نیاز به پايش داشته باشد.

۲-۳

**سازگاری با محیط**

اثر منفی<sup>۱</sup> محیط بر یک پل جدید که نیاز به تصدیق دارد و، شامل اثرات باد، نوفه هوا و ارتعاش زمینی است.

---

1- Impact

۳ - ۳

#### قابلیت تعمیر

حالت حدی است که بعد از آن دیگر یک سازه نمی‌تواند شرایط عملکردی را برآورده کند، به طوری که دیگر برای هدف مورد نظر مناسب نیست.

۳ - ۴

#### پایش

برنامه‌ریزی برای اندازه‌گیری که معمولاً در طول یک دوره زمانی انجام می‌گیرد و به وسیله آن، تغییرها در یک پارامتر مناسب می‌تواند به عنوان تغییر در وضعیت سازه تفسیر شود.

یادآوری - ایجاد یک معیار و مجاز شمردن تغییرات قابل استناد به عوامل محیطی تناوبی از قبیل تغییرات روزانه یا فصلی دما و میزان رطوبت حائز اهمیت است.

۵ - ۳

#### ایمنی دوام

خاصیتی که طبق آن، رفت و آمد بر روی یک پل با سرعت مناسب بر حفظ راستا یا پایداری آن تاثیر زیان‌باری ندارد.

۶ - ۳

#### کیفیت سواری

خاصیتی که بر طبق آن، مسافران داخل وسایل نقلیه‌ای که از یک پل با سرعت مناسب عبور می‌کنند در معرض سطحی از ارتعاش قرار نگیرند که به راحتی آن‌ها تاثیر منفی بگذارد.

### ۴ اندازه‌گیری ارتعاش

#### ۱ ملاحظات کلی

راهنمایی در مورد اندازه‌گیری‌های ارتعاش که در استاندارد ISO 14963 ارائه شده، باید مشاهده شود و الزامات کیفی برای این اندازه‌گیری‌های ارائه شده در استاندارد ISO 14964 باید انجام شود. اندازه‌گیری‌ها می‌تواند بر روی پل‌هایی انجام شود که در حال ساخت و راهاندازی شده و بهره‌برداری شده‌اند.

#### ۲ پایش یک پل حین ساخت و آماده برای راه اندازی

##### ۴-۲-۱ اهداف پایش ارتعاش

شکل‌های ۱ و ۲ روابط بین مراحل مختلف شامل پایش ارتعاش را نشان می‌دهد.

اهداف پایش ارتعاش باید به صورت زیر تعیین شود:

الف- ارزشیابی صحت و قابلیت ساخت سازه ،

ب- ارزشیابی کارآیی سازه، حین ساخت و پس از تکمیل،

پ- ارزشیابی ایمنی پل حین ساخت و پس از تکمیل،

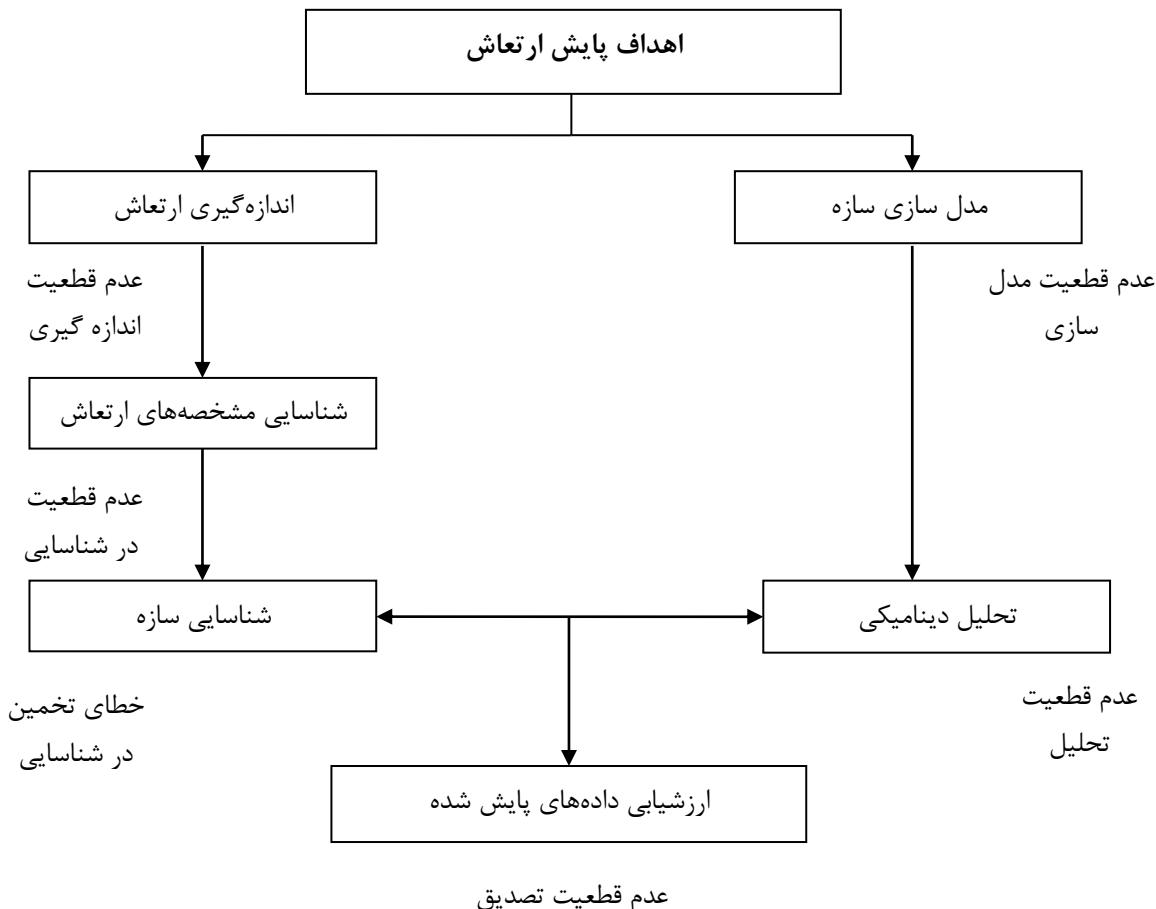
ت- ارزشیابی تعمیرپذیری سازه پس از تکمیل،

ث- ارزشیابی سازگاری با محیط،

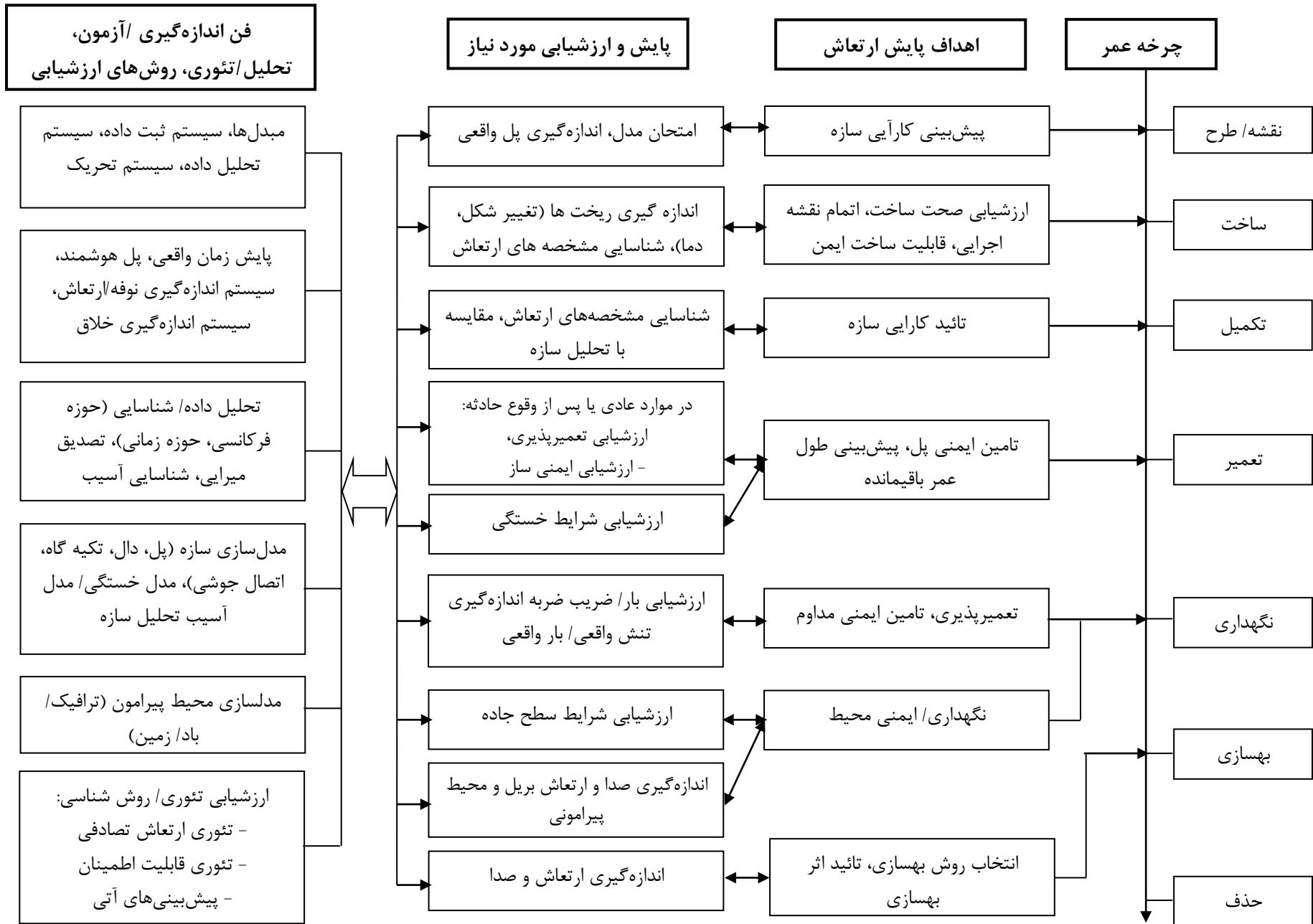
ج- تعیین مشخصه های اولیه ارتعاش به منظور نگهداری و کالیبراسیون مدل عددی پل در دست تعمیر، و

ج- بازخورد طرح سازه.

از عدم قطعیت نتایج هر مرحله از اندازه گیری نمی توان اجتناب کرد و امکان دارد شامل عدم قطعیتی باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. بنابراین کاهش و تعدیل قطعیت و خطای اندازه گیری در مراحل، مورد نیاز می باشد.



شکل ۱- فلوچارت پایش ارتعاش یک پل



شکل ۲- خلاصه‌ای از پایش ارتعاش یک پل

## ۴-۲-۲ ارزشیابی مدیریت ساخت

### ۴-۲-۲-۱ کلیات

اندازه‌گیری‌های ارتعاش در مورد پل می‌تواند حین ساخت انجام شود. برای مثال، از آزمون‌های ارتعاش بر روی کابل‌های پل‌های مهارشده با کابل یا پل‌های معلق برای کنترل کشش کابل‌ها استفاده می‌شود. به منظور کنترل پروفیل پل در حال ساخت، اندازه‌گیری ارتعاش کابل‌ها ضروری است. همچنین اندازه‌گیری‌های دینامیکی ممکن است اثر مخرب سطوح ارتعاش زیاد را بر سازه نشان دهد.

### ۴-۲-۲-۲ ارزشیابی کشش کابل

مشخصه‌های دینامیکی تا حد زیادی تحت تاثیر شرایط تکیه‌گاه است. کشش کابل یک پل مهار شده با کابل یا معلق، یکی از پارامترهای اصلی برای مدیریت سازه می‌باشد. ارتعاش کابل‌ها برای تعیین بسامد طبیعی ارتعاش عرضی به آسانی اندازه‌گیری می‌شود و به کشش کابل بستگی دارد و با یک معادله معروف ارائه می‌شود. در این حالت، مدل عددی نیاز دارد. صلبیت خمشی و تکیه‌گاه انتهایی کابل‌ها را در نظر بگیرد.

### ۴-۲-۲-۳ ارزشیابی قابلیت ساخت سازه

اندازه‌گیری‌های ارتعاش می‌تواند اطلاعات مورد نیازی را فراهم کند، برای تعیین این که کار سازه، هم نایمن است و هم کنترل کیفیت ایمنی یا عدم ایمنی کار و کنترل کیفی آن به صورت مخالف اثر می‌گذارد. اگر ارتعاش پل و باد و تحریک زمین لرزه به‌طور مستمر پایش شود، در صورت بیشتر بودن از حد مجاز می‌توان تصمیم لازم را اتخاذ نمود.

### ۴-۲-۳ مشخصه‌های ارزشیابی کارآیی سازه

#### ۴-۲-۳-۱ کلیات

بسامد طبیعی، میرایی و پاسخ دینامیکی سازه و ناحیه پیرامون آن و انتشار صوت از سازه یا بین آن سازه، مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری هستند که می‌توان برای تصدیق کارآیی سازه از آن‌ها استفاده کرد.

#### ۴-۲-۳-۲ بسامدهای طبیعی و شکل‌های مدد

بسامد طبیعی و شکل مدد پارامترهایی هستند که اندازه‌گیری آن‌ها آسان است. شرایط تکیه‌گاه و دمای سازه عوامل اصلی تاثیر گذار بر ارتعاش طبیعی هستند. به‌نایابین بهتر است قبل و بعد از ساخت سازه پایش شوند. غیرخطی بودن هندسی پل‌های انعطاف‌پذیر و غیر خطی بون مواد روسازه بر روی زیرسازه، جنبه‌هایی هستند که بهتر است در نظر گرفته شوند. این جنبه‌ها به صورت زیر می‌باشند:

- بسامدهای طبیعی؛

- شکل‌های مدد؛

- حرکات پاشنه و شرایط مرزی سازه‌ها؛

- اثرات غیر خطی بودن هندسی سازه؛
- غیر خطی بودن ماده زمین؛
- اثرات وسیله‌های ایزولاتور<sup>۱</sup> و کنترل ارتعاش؛
- اثرات دما.

یادآوری- ایزولاتور و وسیله‌های کنترل ارتعاش برای کاهش ارتعاش نیز می‌توانند معرف غیر خطی بودن باشند.

#### ۴-۲-۳-۳ میرایی

ضریب میرایی ارتعاش یا نسبت میرایی لگاریتمی را نیز می‌توان اندازه‌گیری کرد. اندازه‌گیری ارتعاش بدون میرا توسط توقف ارتعاش اجباری تولید می‌شود که به اندازه‌گیری مستقیمی از مشخصه‌های میرا را حداقل در مد اساسی فراهم می‌کند. دامنه نوسان و وابستگی به دما، عوامل مهمی برای اندازه‌گیری میرایی است. ممکن است، در نظر گرفتن اثرات شرایط تکیه‌گاه و وسیله‌های ایزولاسیون ضروری باشد. وقتی که مشخصه‌های میرایی برای حرکت با دامنه بزرگ مورد نیاز باشد، آزمون‌های ارتعاش اجباری مناسب است که ارتعاش در دامنه بزرگ را تولید می‌کند ارزشیابی زمین لرزه‌ها یا باد قوی مستلزم مقادیر میرا برای حرکت در دامنه بزرگ تولید کند.

عناصری که بر مشخصه‌های میرایی پل‌ها تاثیر می‌گذارند عبارتند از:

- اثرات آئرو دینامیکی و هیدرو دینامیکی؛
- اتصالات و مفصل‌ها؛
- تکیه گاه‌ها و پاشنه‌ها؛
- کف سازی (تغییر شکل مواد)؛
- اثرات زیر سازه؛
- اثرات پی.

وابستگی‌های بسامدها و مشخصه‌های میرایی پل‌ها مستلزم تحلیل دقیق داده‌هاست. مشخصه‌های مختلف میرایی با انواع سازه‌های مختلف و در محل‌های مختلف فراهم خواهد شد بنابراین اثر میرایی کلی برابر با مجموع این عناصر می‌باشد.

#### ۴-۲-۳-۴ مشخصه‌های پاسخ دینامیکی یک سازه با واسطه‌های پیرامون

اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی می‌تواند شامل کرنش، شتاب، سرعت یا جابه‌جایی باشد. همچنین در نظر گرفتن، شرایط مرزی حائز اهمیت است. نتایج حاصل از آزمون‌های ارتعاش محیط یا آزمون‌های ضربه، به علت دامنه کم بارگذاری، می‌تواند برای بعضی از ارزشیابی‌های پاسخ‌های دینامیکی مناسب نباشد. با استفاده از آزمون‌های تحریک اجباری و منحنی‌های پاسخ تشديد، می‌توان داده‌هایی برای حرکت دامنه‌های بزرگتر فراهم کرد. تحلیل صحیح ارتعاش محیط برای دامنه‌های کوچک می‌تواند برای پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها مناسب باشد. آزمون‌ها با استفاده از وسائل نقلیه در حال حرکت، می‌تواند پاسخ دینامیکی به سرعت و الگوی

وسایل نقلیه ارائه دهد. تحلیل خستگی<sup>۱</sup> مستلزم پاسخ دینامیکی به صورت یک هیستوگرام<sup>۲</sup> گستره تنش می‌باشد. نکاتی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از:

- صحت تحلیل ارتعاش محیطی،
- آزمون ضربه برای خاصیت دینامیکی واسطه‌های پیرامونی،
- اثرات آب یا شارش جزر و مدي، و
- روش تحریک.

#### ۴-۲-۳-۵ تابش امواج صوتی پیرامون یا از میان سازه

میکروفون‌های جاسازی شده در زمین پیرامون، می‌توانند بازتاب امواج صوتی پل‌ها که، ناشی از وسائل نقلیه، هستند را شناسایی کنند. مشخصه‌های انتشار موج صوتی برای ارزشیابی اثرات محیط بر نواحی پیرامون به کار می‌رود. پارامترهایی که اندازه‌گیری می‌شوند عبارتند از:

- شدت صوت؛
- بسامد صوت؛
- تراکم عبور و مرور؛
- سرعت عبور و مرور؛
- انواع وسائل نقلیه؛
- اثرات تکانشی<sup>۳</sup>؛
- سختی جاده/ناهمواری سطح؛
- سفتی زمین و عکس العمل آن با زیر سازه.

#### ۴-۲-۴ ارزشیابی ایمنی حین ساخت و پس از تکمیل آن

##### ۴-۲-۴-۱ تأیید طرح برای کارآیی زمین لرزه

در نواحی بسیار مرتعش، پایش ارتعاش برای سازه ایمن ضروری است. مهندسین می‌توانند بسته به داده‌ها، میزان خطر را حین ساخت ارزشیابی کنند و این امر می‌تواند بر روند ساخت تاثیر گذار باشد. داده‌های مربوط به ارتعاش تحت شرایط بارگذاری سخت، حائز اهمیت است. ارزشیابی براساس موارد زیر است:

- مشخصه‌های ارتعاش طبیعی و میرایی آن؛
- مشخصه‌های پاسخ دینامیکی؛
- تقویت سازه؛
- سیستم ایزولاسیون در پل؛
- شناسایی سلامت سازه پس از یک حادثه.

---

1 - Fatigue

2 - Histogram

3 - Impulsive

در مرحله طراحی برای کارآیی زمین لزه، مدل عددی برای پاسخ دینامیکی، بهتر است با ترکیب کل / بخشی از روسازی به کار رفته در طرح ایستا و زیر سازه شامل پی و زمین پیرامون ساخته شود. این داده‌ها بهتر است در تحلیل ارزشیابی مورد استفاده قرار گیرد.

اندازه‌گیری ارتعاش طبیعی زیرسازه پس از ساخت آن و خواص ارتعاش غیر خطی زمین باید مورد توجه قرار گیرد. ارزشیابی مشخصه‌های میرایی همراه با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر مفروض به کار رفته در مرحله طراحی انجام می‌شود. بهتر است شرایط تکیه‌گاه و وابستگی به دامنه نوسان نیز به حساب آید. بهتر است اثر سازه‌های موقتی و کفسازی بر خواص ارتعاش نیز در نظر گرفته شود.

#### ۲-۴-۲ تأیید طرح برای باد

پاسخ دینامیکی باد می‌تواند اندازه‌گیری و با مقادیر فرضی مقایسه شود. ممکن است مقادیر فرضی را از طریق آزمایش‌ها در یک توپلیز باشد به عنوان بخشی از مرحله طرح سازه، به دست آورده. داده‌های اندازه‌گیری شده می‌تواند شامل اثرات سرعت و جهت باد و وابستگی دامنه آن‌ها باشد. پس از تحلیل همه این اثرات، ممکن است از وسائل میرا در نظر گرفته شود.

#### ۳-۴-۲ تأیید طرح خستگی

طرح خستگی، گستره تنش دینامیکی اعضا و تعداد چرخه‌های مواجه شده را در نظر می‌گیرد. در این حالت، گستره تنش با مجموع تنش ایستا و اثر کوپلینگ<sup>۱</sup> با یک وسیله نقلیه در حال حرکت ارایه می‌شود. داده‌های پایش شده برای تنش واقعی بهتر است با مقادیر فرضی به کار رفته در طرح خستگی مقایسه شود. عامل تشیدی‌کننده دینامیکی برای افزایش گستره تنش ایستا به کار می‌رود و به پروفایل جاده/ناهمواری و الگوی مسافرتی بار ترافیکی بستگی دارد. اثرات کوپلینگ با وسائل نقلیه برای پایش سلامت سازه پل مورد نیاز است. ارتعاش متغیری<sup>۲</sup> ناشی از ناهمواری نامنظم سطح دست‌انداز و جاده حائز اهمیت است.

#### ۴-۲-۵ تعمیرپذیری پل تکمیل شده

دریافت ارتعاش پیاده‌روها، اثرات ارتعاش بر وسائل نقلیه در حال حرکت، و راحتی مسافران، بخشی از مشکلات بالقوه تعمیرپذیری است. پایش ارتعاش برای ارزشیابی این اثرات انجام می‌شود و بهتر است طرح بررسی شود و بهتر است اندازه‌گیری‌های ضروری در نظر گرفته شود.

در ارزشیابی دریافت ارتعاش پیاده‌روها، بهتر است دامنه پاسخ دینامیکی و نیز بسامد ارتعاش در نظر گرفته شود. در ارزشیابی اثرات آن بر وسائل نقلیه در حال حرکت و راحتی و آسایش مسافران، بهتر است دامنه پاسخ دینامیکی، بر کف‌ها و محور چرخهای خودرو در نظر گرفته شود.

بهتر است در مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج عددی از مدل سازی بارهای متحرک، اثرات ارتعاش کوپلینگ باید در نظر گرفته شود. ارتعاش پل ناشی از خودروهای متحرک و آسایش مسافران نیز از مسائلی هستند که باید در تعمیرپذیری در نظر گرفته شود.

1- Coupling

2- Non-stationary

#### **۴-۲-۶ ارزشیابی سازگاری با محیط پل تکمیلی شده**

بهتر است ارتعاش محیطی، نوفه و تغییر جهت باد در ارزشیابی سازگاری با محیط به حساب آید. داده‌های پایش شده برای تحلیل این اثرات به کارمی‌رونده و با مشخصه‌های دینامیکی سازه مقایسه می‌شوند. بسته به نتایج حاصله ممکن است اصلاح‌های ضروری انجام شود. شبیه سازی عددی انتشار ارتعاش زمین و تابش امواج صوتی ممکن است برای شناسایی سطح این اثرات مورد استفاده قرار گیرد.

#### **۴-۲-۷ تعیین مشخصه‌های ارتعاش اولیه یک پل تکمیل شده**

پس از ساخت، پایش بلند مدت آغاز می‌شود و مقادیر اولیه مشخصه‌های ارتعاش برای پایش تغییرات در پارامترهای ناشی از خرابی و آسیب مورد نیاز است. اثرات خرابی و آسیب بر مشخصه‌های ارتعاش عموماً اندک می‌باشد، بهنایراین بهتر است از یک روش موثر برای استخراج اطلاعات مورد نیاز درباره آسیب استفاده شود. تحریک موضعی و کاربرد پدیده ضربه<sup>۱</sup> ناشی از اختلافات اندک و پارامترهای مدلی، روش‌های مفیدی هستند.

#### **۴-۲-۸ بازخورد نسبت به کارآیی کلی**

بهتر است داده‌های ارائه شده از طریق ارزشیابی‌های فوق الذکر، به مهندسین طراحی بازخورد شود تا در طرح‌های آتی از آن‌ها استفاده کنند. همچنین طبقه‌بندی داده‌ها وقتی مفید است که داده‌ها در آینده برای طراحی همه انواع پل‌ها به کارمی‌رونده.

#### **۴-۳ پایش یک پل در حال تعمیر**

اهداف پایش ارتعاش یک پل در حال تعمیر عبارتند از:

- ارزشیابی بار متحرک؛
- ارزشیابی کارآیی ساختاری؛
- ارزشیابی اثرات باد و هیدرودینامیک؛
- ارزشیابی ایمنی؛
- ارزشیابی تعمیرپذیری؛
- ارزشیابی سازگاری با محیط.

پایش نرمال و اضطراری ارتعاش پل بسته به مدیریت حفظ و نگهداری پل انجام می‌شود. تحلیل مفصل برای شناسایی آسیب‌ها و عیوب نیاز است. شرایط ترافیکی و ناهمواری جاده و سطوح ریلی و اثرات باد و هیدرودینامیک تاثیر منفی قابل ملاحظه بر تنش خستگی خواهد داشت. بهتر است اثرات دینامیکی از طریق اندازه‌گیری پایش شود.

## ۵ تحلیل داده‌ها و روش شناسایی ساختاری

### ۱-۵ کلیات

هدف، شناسایی ساختاری ایجاد ارتباط مناسب بین مدل عددی پل و اندازه‌گیری‌های آزمایشی می‌باشد. از روی مدل، که ممکن است بر پایه المان محدود باشد، پارامترهای مدلی شناسایی می‌شود که شامل پارامترهای مودال و شکل‌های مدى مربوطه می‌باشد. همان پارامترها را می‌توان با آزمایشات شناسایی کرد که بهتر است مقدار میرایی را برای هر مد تعیین شود. در روش‌های شناسایی ممکن است بسته به شکل، روش‌های اجرایی دامنه زمانی یا دامنه بسامدی اتخاذ شود.

### ۲-۵ تحلیل داده و دامنه<sup>۱</sup>

تحلیل داده‌ها ممکن است در دامنه زمانی یا دامنه بسامدی یا هر دو انجام شود. بسته به مسئله، بهتر است مهندس درباره استفاده هر یک تصمیم‌گیری کند. در بند الف- ۱ رابطه بین دامنه‌های زمانی و بسامدی نشان داده شده است.

در تحلیل داده ارتعاش، توزیع‌های آماری تنش، سرعت، شتاب و جابه‌جایی به دست می‌آید. توزیع‌های تنش و جابه‌جایی برای ارزشیابی شرایط پل به کار می‌رود.

### ۳-۵ دیجیتالی‌کردن

معمولًاً داده به دست آمده از آزمایش‌های، توسط سیگنال آنالوگ با استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) دیجیتالی می‌شود. انتخاب بسامد نمونه برداری یا گام زمان برای روش اجرایی دیجیتالی کردن، حائز اهمیت است و بهتر است به منظور صحت مورد نیاز در حفظ داده‌های آنالوگ، دقت کافی انجام شود. بهتر است مشکلات اصلی زیر در نظر گرفته شود.

#### الف- خطأ در تبدیل A/D

بسامد نمونه برداری مبدل A/D بهتر است به دقت مشخص شود و سازگاری تفکیک‌پذیری با هدف بسامد طبیعی مورد نظر توصیه می‌شود.

#### ب- خواندن اشتباہ مقادیر اوج<sup>۲</sup>

در هر دو دامنه زمانی و بسامدی، این امکان وجود دارد که مقادیر اوج واقعی حین دیجیتالی کردن، شناسایی نشود. از این رو، شکل تابع انتقال و بهتر است مقادیر اوج در شناسایی بسامد و میرایی به هنگام استفاده از روش منبع پهنه‌ای باند<sup>۳</sup> در نظر گرفته شود.

1- Domain

2- Peak

3 - Half- Power band method width

## پ- تفکیک پذیری FFT<sup>۱</sup>

در تبدیل فوریه<sup>۲</sup> برای داده‌های دیجیتالی شده، گرفتن بسامدھای بالاتر از بسامدھای مشخص شده با بازه زمانی داده دیجیتالی شده، <sup>۳</sup> امکان پذیر نیست. این بسامد محدود کننده، بسامد نای کویست<sup>۴</sup> نامیده می‌شود (به مرجع [۱۵] مراجعه شود) و به صورت  $f_N = \frac{1}{(2\Delta t)}$  بیان می‌شود. تفکیک پذیری بسامد،  $\Delta f$ ، با معکوس زمان کل،  $T$ ، به صورت  $\frac{1}{T} = \Delta f$  ارائه شده است.

## ۴-۵ شناسایی مشخصه‌های ارتعاش در دامنه زمانی

### ۴-۵-۱ کلیات

بهتر است بسامد طبیعی، شکل مدلی و ضریب میرایی به هنگام تعیین مشخصه‌های ارتعاش یک سیستم، شناسایی شود. توصیه می‌شود که ضریب میرایی در دامنه زمانی شناسایی شود. اگر وابستگی به دامنه و غیر خطی بودن معنی دار باشد، بهتر است تحلیل در دامنه زمانی انجام شود.

در دامنه زمانی، بهتر است به طور ایده‌آل در هر زمان یک مد درنظر گرفته شود که ممکن است مستلزم استخراج داده از داده اندازه‌گیری شده از طریق پالایش<sup>۵</sup> باشد، وضعیت‌های وجود دارد که در آن بسته به نوع سازه و ساختمان بلوری اعضا، بسامدھایی با گستردگی نزدیک به هم<sup>۶</sup> وجود دارد. در این صورت، استخراج داده برای یک مد دشوار خواهد بود و باید از روش شناسایی برای سیستم‌های مددی با گستردگی نزدیک به هم استفاده شود.

### ۴-۵-۲ استخراج مولفه‌های بسامد طبیعی منفرد

به طور کلی داده‌های اندازه‌گیری شده شامل بسیاری از مدهای ارتعاش است و شناسایی صحیح مشخصه‌های ارتعاش در دامنه زمانی دشوار است. بهتر است به طور ایده‌آل داده‌های منفرد، از داده‌های اندازه‌گیری شده استخراج شود (به بند ب- ۱ مراجعه شود). ممکن است بسامد به روش‌های زیر شناسایی شود:

- تغییر شکل داده‌های اندازه‌گیری شده به دامنه بسامد؛
- پالایش برای استخراج داده مد منفرد؛
- تغییر شکل معکوس از دامنه بسامدی به دامنه زمانی.

ممکن است برای پالایش داده بسته به پیشامد از روش‌های پایین‌گذر، بالاگذر و میان گذر استفاده شود.

### ۴-۵-۳ بسامد طبیعی

شناسایی بسامد طبیعی یک مد منفرد از سابقه زمانی سیگنال، ممکن است دوره زمانی بین دو مورد زیر در نظر گرفته شود:

- پاسخ‌های اوج، و

1 - Fast Fourier transform

2 - Fourier

3 - Nyquist

4- Filtering

5- Closelyspaced

#### - عبور از صفر<sup>۱</sup>

اگر پل دارای وسایل ایزوولاسیون باشد یا تکیه‌گاه وابستگی به دامنه داشته باشد، معمولاً بسامدی طبیعی با دامنه حرکت تغییر خواهد کرد. در این حالت، بهتر است داده مدنفرد استخراج شده، به طور معکوس به دامنه زمانی تغییر شکل دهد تا بتوان این دامنه‌های ارتعاش را با داده اندازه‌گیری شده مقایسه کرد.

#### -۴-۴ مد بسامد طبیعی

اگر میرایی اندازه باشد و سیستم به عنوان یک سیستم میرایی متناسب در نظر گرفته شود، در این صورت بردار جابه‌جایی مربوط مد بسامد طبیعی ثابت بوده و وابسته به زمان نیست. در این حالت بهتر است، مد بسامدی با ترسیم نمودار مربوط به دامنه به عنوان مقادیر نرمال شده، بدست آید. اگر پل دارای وسیله‌های بزرگ میرایی باشد در این صورت مشخصه‌های ارتعاش، میرایی نامتناسب به نمایش می‌گذارد. در این حالت، مد اندازه‌گیری شده، یک تغییر فاز دارد و شکل مودالی حتی در یک دوره ارتعاش تغییر می‌کند. شناسایی این مورد در دامنه زمانی دشوار است.

#### -۴-۵ میرایی

ضریب میرایی  $\zeta$  با داده ارتعاش طبیعی یک مد منفرد در دامنه زمانی شناسایی می‌شود (به شکل ۳ مراجعه شود). کاهش لگاریتمی  $\delta$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\delta = \ln \frac{x_{i-1}}{x_i} \quad (1)$$

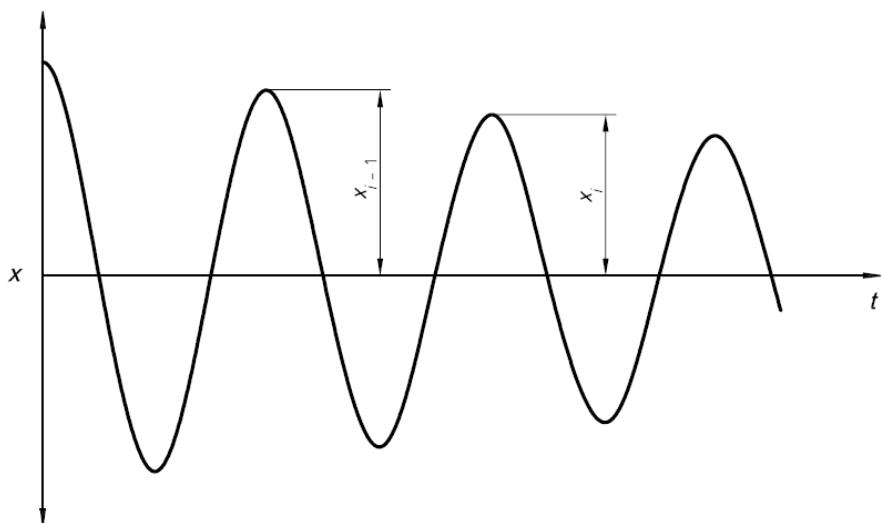
و ضریب میرایی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (2)$$

ضریب میرایی اندازه‌گیری شده می‌تواند بسته به اثر ارتعاش گذرا تغییر کند. از این رو بهتر است در شناسایی، متوسط‌گیری از بخش‌های مختلف امواج یا امواج تکه‌ای از دامنه‌ای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهتر است برای شناسایی ضرایب میرایی، از روش تطبیق منحنی<sup>۲</sup> یا اتخاذ روش حداقل مربعات غیر خطی استفاده شود (به مرجع [۱۵] در کتابنامه مراجعه شود).

---

1 - Zero- Crossings  
1- Curve- fitting Method



شکل ۳- شناسایی ضریب میرایی در دامنه زمان

#### ۴-۵ شناسایی مشخصه‌های ارتعاش با مدهایی با گستره‌ی نزدیک به هم

در سازه‌های با مقیاس بزرگ با انواع مختلف ساختاری، مدهایی با بسامدهایی با گستردگی نزدیک به هم می‌تواند وجود داشته باشد.

مثال‌ها:

الف- پل تخت<sup>۱</sup> معلق: نخستین مد متقارن بسته به نسبت دهنده به نقطه گود<sup>۲</sup>، به نخستین مد نامتقارن نزدیک است.

ب- پل با مهاربند کابل: در پل‌های با مهاربند کابل از نوع چند کابلی غالباً بسامدهایی با گستره‌ی نزدیک به هم بین سیستم ارتعاش کل و سیستم کابل، روی می‌دهد.

پ- پلی که دارای میراگر جرمی تنظیم شده است: در اینجا پدیده ضربه ارتعاشی دیده می‌شود و شناسایی مشخصه‌های ارتعاش با روش فوق دشوار است.

روش‌های توصیه شده برای این موارد عبارتند از:

- برآورد با استفاده از داده موج ضربه‌ای منتج از دو مد منفرد؛

- استخراج بسامدهای جداگانه با منطبق کردن داده ضربه‌ای با یک تابع وزنی؛

- روش پردازش؛

- روش EK-WGI (پالایه کالمون<sup>۳</sup> گسترده).

#### ۴-۶ فن کاهش تصادفی (روش RD)

با ارتعاش طبیعی یا محیطی، بهتر است مقدار انتظار نیروی تحریک تصادفی، به صورت نوفه سفید در نظر گرفته شود. به منظور انطباق تعداد معینی از داده‌های موجی، مولفه‌های معنی‌داری از یک بسامد طبیعی ارائه می‌دهد، بهتر است با در نظر گرفتن وابستگی دامنه و روش پالایه بین گذر که استفاده شده، دقت کافی انجام شود.

#### ۴-۷ شناسایی مشخصه‌های ارتعاش در دامنه بسامدی

در استفاده از تحلیل دامنه بسامدی، مزایایی وجود دارد که عبارتند از:

- بسامدها بوضوح در تابع انتقال و طیف توانی دیده می‌شوند.

- با استفاده از تحلیل مدلی می‌توان مشخصه‌های مدلی را شناسایی کرد.

- توابع انتقال مضاعف به صورت تابع پاسخ ضربه‌ای بدست می‌آیند تا ورودی را به اثر خروجی مرتبط کنند.

- تحلیل آماری با فرض یک فرآیند ایستا، به آسانی اعمال می‌شود.

- برای استخراج این پارامترها نیاز است، اثرات ارتعاش غیر ایستا (ضربه‌ای) به دقت در نظر گرفته شود.

اما معایبی نیز وجود دارد که عبارتند از:

- درمورد سیستم‌های غیر خطی و سیستم‌های وابسته به زمان، تحلیل غیر ممکن است.

1- Slab

2- Sag- span

3- Kalman filter

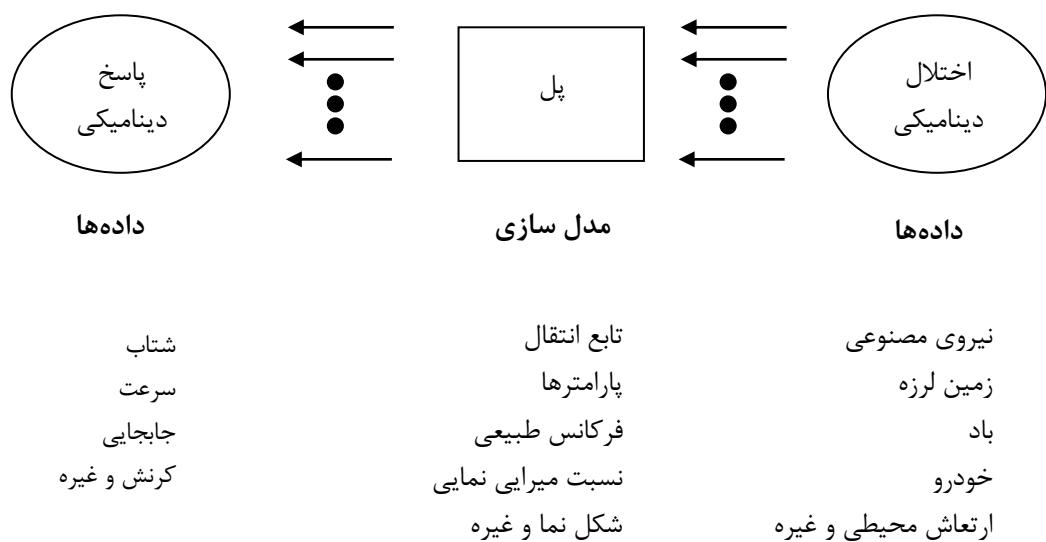
- بسته به مشکلات ممکن است صحت کاهش یابد.  
تحلیل طیفی غیر ایستا، از قبیل تحلیل موجک<sup>۱</sup> ممکن است از بعضی از این معایب جلوگیری کند. محاسبه تابع انتقال از داده‌های اندازه‌گیری شده در بند ب-۲ نشان داده است.

#### ۶-۵ شناسایی ساختاری و تحلیل معکوس

در تئوری شناسایی سیستم، روش شناسایی ساختاری اعمال می‌شود و برای ارتباط تحریک (وروودی) با پاسخ ارتعاش (خروجی)، یک مدل ریاضی شناسایی می‌شود (به شکل ۴ مراجعه شود). صحت مدل ریاضی با استفاده از تابع هدف خطای بین مدل ریاضی و سازه واقعی ارزشیابی می‌شود. ماتریس‌های مشخصه که به عنوان ماتریس‌های ضریب نسبی برای معادلات حاکم در حرکت با چند درجه آزادی هستند به عنوان ماتریس‌های جرمی، میرایی و سفتی تعریف می‌شوند. پارامترهای مدلی با استفاده از تحلیل مقدار مشخصه مرکب در این معادلات حاکم شناسایی می‌شوند (به بندهای الف- ۳ و ب- ۲ مراجعه شود).

برای مدهای بسامد بالاتر، به نقاط اندازه‌گیری زیادی برای اندازه‌گیری شکل مد نیاز است. کاربرد شناسایی ساختاری و تحلیل معکوس برای شناسایی مشخصه‌هایی ارتعاش داده‌ها از تعداد محدودی از نقاط اندازه‌گیری می‌باشد. تحلیل تابع خطای تصادفی<sup>۲</sup> برای ارزشیابی صحت پارامترهای شناسایی شده نیز مفید است.

سیستم ساختاری



شکل ۴- رابطه بین ورودی و خروجی یک سیستم ساختاری

1- Wavelet  
2- Stochastic

## مدل سازی پل‌ها و محیط پیرامون آن‌ها

### ۱-۶ مدل سازی سازه‌های پل

سازه یک پل یک سازه سه بعدی است که دارای تیر، صفحه، کابل، ستون‌ها، پی و عناصر دیگر می‌باشد. برای مدل سازی این سازه‌های هندسی، بهتر است مشخصه‌های ساختاری و مواد اعضا به حساب آید. به طور کلی، توصیه می‌شود که در تحلیل، از مدل دارای جزئیات بیشتر استفاده شود. بسته به مسئله‌ای که مدل سازی می‌شود، ممکن است از تئوری تیر یا صفحه ساده و موثر استفاده شود. در تحلیل دینامیکی با روش المان محدود (FEM)، روش‌های زیادی برای مدل سازی جرم سازه، از قبیل مدل‌های توده‌ای یا جرمی سازگار وجود دارد.

انواع پل به صورت زیر طبقه بندی می‌شوند:

- پل تیر حمالی<sup>۱</sup> ،
- پل خرپایی<sup>۲</sup> ،
- پل قالب‌بندی، شده<sup>۳</sup>
- پل قوسی<sup>۴</sup> ،
- پل دال معلق
- پل معلق
- پل کابلی

به طور کلی این پل‌ها در پایه‌های مختلف و دیوارهای انتهایی دو طرف پل تقویت می‌شوند تا نیروها را به زمین انتقال دهند. اگر عرض پل در مقایسه با طول آن کم باشد، سازه پل با استفاده از عناصر قالبی فضایی یا صفحه‌ای در تحلیل دینامیکی مدل سازی می‌شوند. استحکام محوری، خمشی و پیچشی این عناصر قالبی، در تحلیل عددی به حساب می‌آید. توصیه‌هایی برای مدل سازی انواع مختلف سازه‌های پل در زیر ارائه شده است.

#### الف- پل‌های تیر حمالی

این پل‌ها شامل تیرهای حمال اصلی با سطح مقطع باز یا بسته (جعبه) و تیرهای متقطع (تیرهای کف) برای اتصال تیرهای حمال اصلی و تخت می‌باشند. اگر عرض پل در مقایسه با دهنده آن کم باشد، ممکن است پل با عناصر تیر و با در نظر گرفتن ارتعاش خمشی مدل سازی شود. در مورد پل‌های تیر حمالی منحنی، بهتر است اثر کوپلینگ بین ارتعاش پیچشی و خمشی را شامل شده باشد.

1 - Girder.

2- Truss

3 - Framed

4 - Arch

## **ب- پل‌های خرپایی**

این پل‌ها شامل عناصر قالبی فضایی می‌باشند و اتصال عناصر به صورت اتصال لولایی (منفصل) در نظر گرفته می‌شود تا فقط تغییر شکل محوری اعضا به حساب آید. پل‌های خرپایی فضایی معمولاً دارای اجزای زیادی هستند، به طوری که کاهش یا ساده‌سازی بهتر است تعداد درجات درجه آزادی در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شود. تئوری تیر موثر که سازه فضایی را با اجزای تیر ساده جایگزین می‌کند، فن مفیدی است. روش ساده‌سازی دیگر، استفاده از مدل یک سیستم جرمی فضایی است. سفتی پانل یک خرپایی فضایی با استفاده از اجزای جعبه‌ای موثر مدل‌سازی می‌شود و جرم پانل با مرکز کردن جرم در مرکز جزء جعبه به حساب می‌آید.

## **پ- پل‌های قالب‌بندی شده**

صلبیت محوری اعضای پل‌های قالب‌بندی شده قابل چشم‌پوشی نیست. بهتر است تغییر شکل خارج از صفحه و پیچشی در تحلیل سه بعدی پاسخ دینامیکی در نظر گرفته شود. اگر یک پل قالب‌بندی شده در یک زمین ضعیف، دارای تکیه‌گاه باشد، بهتر است اثر شرایط تکیه‌گاه آن در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شود. ممکن است شرایط تکیه‌گاه در میرایی سهیم باشد، بنابراین اصلاح زمین یا محیط پیرامون حائز اهمیت است.

## **ت- پل‌های قوسی**

در مدل سازی پل‌های قوسی، تقریباً چند ضلعی با استفاده از اجزای مستقیم، مفید است. اثر اتصال بین قوس (از جمله قوس تحتانی) و عنصر سفت کننده عمودی، بر حسب نوع مسئله به صورت اتصال مفصلی (لولایی) یا صلب در نظر گرفته می‌شود. غیر خطی بودن هندسی اعضا قوس، در بعضی موارد قابل اغماض نیست. پس تنش و جابه‌جایی از نتایج حاصله از تئوری تغییر شکل اندک، متفاوت خواهد بود. اگر دهانه قوس کوچک باشد، تئوری تغییر شکل اندک قابل اجرا خواهد بود.

## **ث- پل‌های دال معلق**

این پل‌ها دارای دال‌ها و کابل‌های نازکی هستند و می‌توانند در معرض تغییر شکل‌های بزرگ باشند. از این رو ممکن است ارتعاش ناشی از باد و تعمیرپذیری پیاده‌روها نیاز باشد. اگر نسبت خمیدگی به دهانه،  $f/l$ ، زیاد باشد، بهتر است مدل عددی شامل این اثرات کوپلینگ متناسب باشد. مدل‌سازی سه بعدی برای شامل شدن مدهای پیچشی ارتعاشی توصیه می‌شود.

## **ج- پل‌های معلق**

رفتار ارتعاشی پل‌های معلق در نظر گرفته شده در دو سیستم، بسته به مسئله مربوطه حل می‌شود. یکی از سیستم‌های ارتعاشی شامل ترکیبی از کابل‌ها، تیرهای حمال سفت و آویزهای عمودی است. سیستم دیگر، سیستم ارتعاشی کامل است که شامل برج، پایه، پی و محیط پیرامون آن است. اولین سیستم، اصولاً برای

تحلیل پاسخ عملکردی تحت بار باد و تحلیل پاسخ دینامیکی تحت بار ترافیکی به کار می‌رود. دومین سیستم، اصولاً برای کارآیی حین زمین لرزه به کار می‌رود. کابل و اجزای ساختاری تیرهای حمال سفت‌کننده دارای مشخصه‌های ارتعاشی متفاوتی هستند. پس رفتار دینامیکی، پیچیده است و سیستم دارای اثرات کوپلینگ بین مدهای عمودی و پیچشی است. ب طور نرمال تئوری تغییر شکل محدود برای مدل سازی این پلهای معلق به کار می‌رود.

### چ- پلهای با مهاربند کابل

این پلهای حاوی برج‌ها، کابل‌های مایل، تیرهای حمال سفت‌کننده و زیرسازه‌ها هستند. اجزاء دارای مشخصه‌های ارتعاشی متفاوتی هستند و ارتعاش کوپلینگ روی می‌دهد. بعضی اوقات ارتعاش کویل شده بین کابل‌ها و تیر حمال معنی‌دار است. مدهای بسامد بالا اثرات کوپلینگ قوی بین آن‌ها دارد. مدل‌سازی سه بعدی توصیه می‌شود. برای ارزشیابی کارآیی مقاومت باد، ممکن است از مدل‌سازی ساده شده استفاده شود.

## ۶-۲ مدل سازی بارهای ترافیکی

### ۶-۲-۱ مدل سازی وسائل نقلیه

در تحلیل ارتعاش کوپلینگ بین پل و وسائل نقلیه، روش‌های متعددی برای مدل سازی وسائل نقلیه وجود دارد. بسته به شکل مسئله که باید حل شود، مدل‌های با یک درجه آزادی (1-DOF)، دو درجه آزادی (2-DOF) و چند درجه آزادی (M-DOF) برای مدل‌سازی وسیله نقلیه به کار می‌رود؛ برای تطبیق نتایج اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی وسیله نقلیه حائز اهمیت است. اگر اثر کوپلینگ به حساب آید، بهتر است اثر مجموعه‌های پیوسته وسائل نقلیه نادیده گرفته نشود. اگر اثر ترافیک پیوسته در نظر گرفته شود، اثر تقویت دینامیکی در مقایسه با نتایج مدل یک وسیله نقلیه‌ای در شبیه سازی عددی، کاهش خواهد داشت. توزیع فواصل بین وسائل نقلیه نیز عاملی است که بهتر است، در نظر گرفته شود.

برای مدل سازی وسیله نقلیه ریلی<sup>۱</sup>، بهتر است از یک مدل ارتعاش چند بدن‌ای شامل یک بدن‌های خودرو، بارکش و مجموعه چرخ‌های متصل با فنرها و میراگرها استفاده شود. بهتر است در مدل سازی بین قطار با واگن تخت<sup>۲</sup> و قطار نوع مفصلی<sup>۳</sup>، تفاوت قائل شد. تعداد وسائل نقلیه در یک قطار، طول قطار و فاصله محوری بین دو محور چرخ جلو و عقب قطار<sup>۴</sup> عواملی هستند که بهتر است در محاسبه دامنه دینامیکی پاسخ پل در نظر گرفته شود.

### ۶-۲-۲ ناهمواری سطح

وقتی اثر کوپلینگ ارتعاشی بین پل، سطح مسیر و وسیله نقلیه در نظر گرفته شود، اثر ناهمواری سطح مسیر قابل چشم‌پوشی نیست. ممکن است از استاندارد ISO 8608 برای ارزشیابی بی‌اثر کوپلینگ استفاده شود.

### ۶-۳ مدل سازی راه رفتن انسان و اثر دینامیکی آن

1 - Railway vehicle

2 - Bogie-type Train

3 - Articulated type train

4 - Wheelbase

مدل‌های پیاده‌روی و بار دینامیکی بر روی پل برای ارزشیابی تعمیرپذیری ارتعاش پل‌های عابر پیاده به کار می‌رود. روش‌های متعددی برای مدل سازی بار پیاده‌روی در پیوست پ نشان داده شده است. مد ارتعاشی افقی، یک پل عابر پیاده نوع معلق با اثر کوپلینگ بین (نیمی‌از) بسامد گامی و بسامد طبیعی مد عرضی افقی پل تسريع می‌شود. در این حالت، مد بار جانبی برای ارزشیابی این اثرات کوپلینگ مفید می‌باشد. (به کتابنامه مراجع [۱۳]، [۱۴] و [۲۲] مراجعه شود).

#### ۶- بار باد

بار باد در پل در رفتار ایستا و دینامیکی به صورت زیر به حساب می‌آید:

##### الف- ایستا

- تغییر شکل ایستا با فشار هوای ایستا؛

- پدیده ناپایدار ناشی از فشار هوای ایستا (واگرایی، کمانش<sup>۱</sup> افقی).

##### ب- دینامیک

- ارتعاش شارش گردابی<sup>۲</sup>؛

- ارتعاش شلاقی<sup>۳</sup> و ارتعاش ناشی از حرکت نامنظم<sup>۴</sup>.

ارتعاش ناشی از فشار هوای متغیر یا فشار هوای غیر ایستا به مشخصه‌های باد طبیعی بستگی دارد. اگر اثرات باد در ارزشیابی در نظر گرفته شود، بهتر است مشخصه‌های ارتعاشی سرعت باد نیز به صورت به حساب آید:

- انحراف استاندارد عمل باد؛

- چگالی طیف توانی سرعت باد؛

- مقیاس فضایی ارتعاش تصادفی؛

- ارتباط فضایی سرعت باد؛

- زاویه عمودی باد؛

- توزیع بسامد سرعت.

#### ۶- ۵ مدل سازی زمین برای ارتعاش پل دره‌گذر

در تحلیل ارتعاش کوپلینگ بین پل دره‌گذر و زمین پیرامون آن، بهتر است در مدل سازی زمین به مشخصه‌های زمین در نظر گرفته شود که ممکن است شامل چینه‌بندی، سازه‌های ادغام شده و سیستم‌های دیگر باشد. اما به طور نرمال از مدل سازی نیم‌فضای الاستیک یکنواخت نیم‌انتهای فرضی یا مختصات سه بعدی برای ساده‌سازی استفاده می‌شود.

1 - Buckling

2 - Vortex flow

3 - galloping vibration

4 - flutter vibration

## ۷ ارزشیابی داده‌های پایش شده و کاربرد آن

### ۱-۷ روش ارزشیابی و معیارهای ارزشیابی

#### ۷-۱-۱ طبقه‌بندی ارزشیابی

برای کسب اطلاعات درباره کارآیی پل، داده‌های اندازه‌گیری شده، مورد تحلیل قرار می‌گیرد و تصمیمات کمّی و کیفی براساس این اطلاعات گرفته می‌شود. ارزشیابی داده‌های پایش شده برای بررسی اینمنی، تشخیص بی‌عیبی، تعمیرپذیری و اثرات محیطی سازه‌ها انجام می‌شود. در فرایند ارزشیابی، بهتر است قابلیت اطمینان و تناسب سازه روشن شود. به طوری که بتوان از استانداردهای منتشر شده به عنوان پایه برای ارزشیابی استفاده کرد. به طور کلی، مقادیر معقول و استاندارد شده یا مقادیر حالت کرانی پارامترهای ارزشیابی به عنوان یک استاندارد ارزشیابی به کار می‌رود.

از آنجائی که مقادیر استاندارد برای ارزشیابی وضعیت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود بهتر است آن‌ها به گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی شوند. در بعضی موارد، ارزشیابی برای ترکیب گروه‌ها، انجام می‌شود. اگر ارزشیابی کیفی باشد و کمی نباشد، بهتر است ارزشیابی مقایسه‌ای به صورتی نجام شود که برای چهار گروه زیر توصیف شده، است:

**گروه ۱:** زمانی که مقادیر حالت حدی وجود دارد. اساس ارزشیابی، بررسی این نکته است که آیا مقادیر پایش شده از حد کرانی تجاوز کرده یا نکرده‌اند.

**گروه ۲:** وقتی که مقادیر تعریف شده یا گستره‌های تعریف شده از شرایط وجود دارد. پایه ارزشیابی، مقایسه داده‌های پایش شده با آن مقادیر یا گستره‌های تعریف شده است.

**گروه ۳:** وقتی که مقادیر برآورده شده برای شرایط سالم یا شرایط مشابه سازه وجود دارد. اگر مقادیر ارزشیابی برای حالت‌های حدی یا مدهای تعریف شده، روشن نباشد، مقادیر برآورده شده به طور عددی برای مورد شرایط سالم یا شرایط مشابه، قابل استفاده خواهد بود. در این حالت، پایه ارزشیابی، بررسی این نکته است که آیا داده‌های پایش شده از آن مقادیر برآورده شده بیشتر از یا نه یا این که آن‌ها در داخل گستره مقادیر برآورده شده با یک خطای قابل قبول هستند یا نیستند.

**گروه ۴:** وقتی که داده‌های پایش شده برای شرایط قبلی یا مقادیر عددی برای شرایط مشابه وجود دارد. اگر داده‌های پایش شده قبلی یا داده‌هایی برای شرایط فرضی، قابل دسترس باشد، می‌توان داده‌های اندازه‌گیری شده را با آن داده‌ها برای ارزشیابی میزان اصلاح یا زوال سازه مقایسه کرد.

#### ۷-۱-۲ عوامل در نظر گرفته شده در ارزشیابی

عواملی که بهتر است در ارزشیابی در نظر گرفته شود:

- الف- عدم قطعیت اندازه‌گیری در داده‌های پایش شده،
- ب- تغییرپذیری مشخصه‌های ساختاری مورد ارزشیابی،

پ- اختلاف بین حالت اندازه‌گیری شده (پایش شده) و مد ارزشیابی شده، وقتی که مقادیر استاندارد به عنوان پارامترهای ارزشیابی محاسبه می‌شوند. بهتر است اختلاف بین شرایط واقعی و شرایط استاندارد، به حساب آید.

به عنوان یک مثال، توصیه می‌شود که خطای بین بسامد طبیعی اندازه‌گیری شده و برآورد شده یک مد نوعی بهتر است بیش از درصد ارائه شده نباشد.

#### ۲-۷ ارزشیابی حین ساخت

برای ارزشیابی ارتعاش پل حین ساخت، مقادیر کرانی ارتعاش توسط ممیزین تنظیم می‌شود. دامنه، سرعت، میرایی و بسامد ارتعاش، نشانگرها اصلی هستند. بهتر است مدیر ساخت از داده‌های پایش شده برای تصمیم‌گیری درباره نحوه مدیریت ساخت استفاده کند.

در صورت تجاوز ارتعاش از حدود، ممکن است به وسایل میراگر نیاز باشد. بهتر است ارزشیابی این وسایل با ارزشیابی داده‌های اندازه‌گیری شده انجام شود.

#### ۳-۷ ارزشیابی ایمنی ساختاری در پل‌های در دست تعمیر

##### ۷-۳-۱ ارزشیابی خسارت

به طور کلی، اگر آسیب در یک سازه افزایش یابد، بسامدهای طبیعی پایین‌تر کاهش می‌یابد و ضرایب میرایی ارتعاش افزایش می‌یابد. چون این تغییرات اندک هستند، شناسایی صحیح میزان آسیب دشوار است. اندازه‌گیری‌های آن بخش از سازه که در آن احتمال آسیب بیشتر است، ممکن است به شناسایی خسارت موضعی از طریق تحلیل پاسخ دینامیکی کمک کند.

چون انتشار آسیب در پل عموماً آهسته است، بنابراین بسته به شرایط خارجی، پایش مشخصه‌های ارتعاش در دراز مدت برای ارزشیابی سلامت سازه مفید است. تمایل کلی برای تغییر مشخصه‌های ساختاری با انتشار آسیب می‌تواند ارزشیابی شود.

##### ۷-۳-۲ تاثیر اثرات بهسازی

وقتی که پلی بهسازی می‌شود و ارتعاش آن پایش می‌شود، ارزشیابی بهسازی را می‌توان از طریق مقایسه نتایج، قبل و بعد از نوسازی انجام داد. دو مورد باید شناسایی شود که عبارتند از:

**مورد ۱:** برای کاهش ارتعاش پل، تقویت انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌ها، ارزشیابی کاهش ارتعاش را امکان‌پذیر می‌سازد.

**مورد ۲:** اندازه‌گیری‌ها برای ارزشیابی اثرات غیر مستقیم تقویت با شناسایی تغییر مشخصه‌های ارتعاشی در بخش‌هایی از سازه انجام می‌شود.

##### ۷-۳-۳ ارزشیابی ایمنی یک پل آسیب دیده

در وضعیت اضطراری پس از زمین لرزه، آتش سوزی، باد قوی یا طوفان، ثبت بعضی از پل‌ها برای کارهای نجات، ضروری است. در این حالت، ظرفیت باقیمانده پل‌های آسیب دیده باید سریعاً ارزشیابی شود. پس از تعمیر خرابی، بهتر است اندازه‌گیری‌هایی برای تأیید تاثیر تعمیرات، با ارزشیابی نتایج اندازه‌گیری انجام شود.

#### ۴-۳ ارزشیابی شرایط خستگی

توزیع آماری تنش بر عناصر پل از طریق اندازه‌گیری ارتعاش به صورت یک سابقه زمانی ارتعاش بدست می‌آید. روش شارش بارشی برای بدست آوردن توزیع گستره تنش و بسامد وقوع آن به کار می‌رود. ارزشیابی شرایط خستگی اساساً با استفاده از قانون ماینر<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد:

$$D = \sum_i n_i / N_i \quad (3)$$

که در آن:

$n_i$  چرخه تکرار واقعی است،  
 $N_i$  تعداد محدود گسیختگی<sup>۲</sup> برای هر گستره تنش است، ( $i = 1, 2, \dots, k$ )، عموماً در آزمایشگاه بدست می‌آید.

در تحلیل داده‌های پایش شده، توزیع‌های آماری تنش، سرعت، شتاب و جابه‌جایی بدست می‌آید. توزیع‌های تنش و جابه‌جایی برای ارزشیابی شرایط پل‌ها به کار می‌رود.

#### ۴-۳-۵ ایمنی مداوم قطارها روی ریل‌ها

معیار ایمنی با خطر از خارج شدن یک قطار در حال حرکت، تعیین می‌شود. خطر خارج شدن قطار از خط با استفاده از نیروهای عمل کننده بین چرخ‌ها و ریل‌ها ارزشیابی می‌شود. کاهش بار چرخ، میزان فشار<sup>۳</sup> محوری جانبی چرخ، و نسبت فشار محوری جانبی و بار چرخ<sup>۴</sup> (ضریب خارج شدن قطار از خط نامیده می‌شود)، غالباً برای ارزشیابی به کار می‌روند. برای جلوگیری از ناپایداری مسیر ماسه‌ای، شتاب بدن پل نیز به کار می‌رود.

#### ۴-۴ ارزشیابی تعمیرپذیری

##### ۴-۴-۱ ارزشیابی تعمیرپذیری یک پل بزرگراه

معیار حساسیت بدن انسان در یک پیاده روی پل<sup>۵</sup> را بطور بین المللی مورد توافق قرار نگرفته است، اما معیار کلی برای حساسیت انسان وجود دارد (به استاندارد ISO 2631-1 مراجعه شود). بسته به مسئله، شتاب یا سرعت اندازه‌گیری می‌شود و از طریق مقایسه با معیار ارزشیابی می‌شود.

##### ۴-۴-۲ ارزشیابی تعمیرپذیری پل راه آهن

تعمیرپذیری پل راه آهن در درجه اول با کیفیت سواری مسافرین ارزشیابی می‌شود (به استاندارد ISO 2631-4 رجوع شود). معمولاً کیفیت سواری با استفاده از میزان شتاب اندازه‌گیری شده در کف بدن خودرو شمرده می‌شود. ارتعاشات با خمش و / با چرخش‌های زاویه‌های انتهایی پل که معمولاً انتقالی هستند، القاء می‌شوند بنابراین مقدار اوج شتاب برای ارزشیابی مناسب است.

1 - Miner

2 - Failure

3 - Thrust

4 - Ballasted Track

5 - Walk way of a highway bridge

### **۴-۳ ارزشیابی تعمیرپذیری یک پل عابر پیاده**

بسامد و شتاب یا سرعت پاسخ اندازه‌گیری شده، پارامترهایی هستند که بهتر است در ارزشیابی تعمیرپذیری پل‌های عابر پیاده ارزشیابی شوند. معیار حساسیت بدن انسان به عنوان سطح ممکن ارتعاش وجود دارد (به استاندارد ISO 2631-1 رجوع شود).

### **۵-۷ ارزشیابی ارتعاش محیط**

ارتعاش زمین و زیر صورت ناشی از پل دره‌گذر بهتر است از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده ارزشیابی شود. بسامد و میزان داده‌های اندازه‌گیری شده بهتر است با معیارهای راحتی و کارآیی بدن انسان مقایسه شود که در معرض ارتعاش است (به استاندارد ISO2631-1 رجوع شود).

## پیوست الف

### (اطلاعاتی)

#### تحلیل داده‌ها در دامنه‌های زمانی و بسامدی

##### الف-۱ بیان پاسخ در دامنه‌های زمانی و بسامدی

یک سیستم خطی تحمیل شده با تحریک خارجی با استفاده از متغیر شرطی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{x} = Ax + Bf \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن:

$x$  و  $\dot{x}$  بردار متغیر شرطی و مشتق زمانی آن هستند؛

$f$  بردار تحریک خارجی است؛

$A$  و  $B$  ماتریس‌های ضریب هستند.

معادله حرکت درجه n آزادی، برای تحریک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -Mr\ddot{x}_g \quad (\text{الف-۲})$$

که در آن:

$Y$  بردار جابه‌جایی پاسخ می‌باشد؛

$M$  ماتریس جرمی است؛

$C$  ماتریس میرایی است؛

$K$  ماتریس سفتی می‌باشد؛

$r$  بردار ضریب تاثیر است؛

$\ddot{x}_g$  شتاب تحریک است.

اگر معادله الف-۲ با استفاده از روابط زیر جایگزین شود:

$$x = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & . \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -r \\ . \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

که در آن  $I$  یک ماتریس هويت و  $1$  بردار ستونی یک‌ها می‌باشد، معادله الف-۲ به معادله الف-۱ کاهش

می‌یابد. پاسخ ضربه‌ای  $x$  برای معادله الف-۱ ناشی از یک ورودی ضربه‌ای  $f = \delta(t - t_0)$  برای معادله الف-

۱ در  $t = t_0$  به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{x}(t - t_0) = e^{A(t - t_0)} BH(t - t_0) \quad (\text{الف-۳})$$

که در آن:

$\delta$  تابع دلتای دیراک است؛

$H$  تابع مرحله‌ای هویساید است.

پاسخ ضربه‌ای ناشی از  $f$  با معادله زیر ارائه می‌شود:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t-t) f(t) dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(\tau) f(t-\tau) d\tau$$

الف - ۴

برای بدست آوردن پاسخ کلی در دامنه زمانی، استفاده از انتگرال دوهامل<sup>۱</sup> ضروری است. برای تبدیل رابطه بین پاسخ و تحریک به دامنه بسامدی، بهتر است از تبدیل فوریه در معادله (الف - ۴) استفاده شود:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(\tau) f(t-\tau) e^{-i\omega t} d\tau dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} e^{A(\tau)} BH(\tau) e^{-i\omega t} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) e^{-i\omega t} d(t-\tau) \\ X(\omega) = H(\omega) F(\omega)$$

الف - ۵

که در آن  $H(\omega)$  تبدیل فوریه تابع پاسخ ضربه‌ای است و تابع انتقال یا تابع پاسخ بسامدی نامیده می‌شود. با این رویه اجرایی در دامنه بسامدی، ممکن است به جای انتگرال دوهامل برای دامنه زمانی از تکثیر توابع استفاده شود، همان‌طور که برای مثال برای طیف توانی  $S$  مشاهده می‌شود:

$$S_{xx}(\omega) = H(\omega) H(-\omega) S_{ff}(\omega)$$

الف - ۶

در معادلات (الف - ۵) و (الف - ۶)،  $X$  و  $F$  بردارها و  $H$  ماتریسی برای سیستم چند ورودی، چند خروجی (MIMO) است. اگر آن یک سیستم ورودی منفرد و خروجی منفرد (SISO) باشد، در این صورت آن‌ها توابع اسکالر هستند:

$$X(\omega) = H(\omega) F(\omega)$$

الف - ۷

برای طیف‌های عرضی و توانی آن‌ها به صورت زیر هستند:

$$S_{xx}(\omega) = H(\omega) H(-\omega) S_{ff}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega)$$

الف - ۸

$$S_{fx}(\omega) = H(\omega) H(\omega) S_{ff}(\omega)$$

الف - ۹

$$S_{xx}(\omega) = H(\omega) S_{xf}(\omega)$$

الف - ۱۰

ب طور کلی، پاسخ ارتعاشی  $x$  اندازه‌گیری می‌شود و  $f$  ممکن است بسته به مسئله مورد نظر اندازه‌گیری شود. مقایسه طیف اندازه‌گیری شده با مقادیر فرضی در طرح و محاسبه شناسایی پارامتر، بهتر است ارزشیابی شرایط ساختاری انجام گیرد.

## الف - ۲ محاسبه تابع انتقال با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده

تابع انتقال  $(\omega)$  با استفاده از معادله (الف - ۷) به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$H(\omega) = X(\omega) / F(\omega)$$

الف - ۱۱

بهتر است به خطاهایی که در داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارند توجه شود. اگر داده‌های اندازه‌گیری شده  $X^*$  دارای خطای  $N(\omega)$  باشد، یعنی:

$$X^*(\omega) = X(\omega) + N(\omega)$$

الف - ۱۲

پس با اعمال معادله (الف - ۷)، داریم:

1- Duhamel integral

$$H^*(\omega) = X^*(\omega) / F(\omega) = X(\omega) / F(\omega) + N_s(\omega) / F(\omega) \quad (\text{الف-}13)$$

بنابراین اگر نسبت طیف‌های فوریه به آسانی اتخاذ شود، در این صورت خطا مستقیماً در تابع انتقال ظاهر می‌شود. از طرف دیگر، اگر طیف عرضی با  $F$  در معادله الف-۱۲ در نظر گرفته شود:

$$S_{fx^*}(\omega) = S_{fx}(\omega) + S_{fn}(\omega) \quad (\text{الف-}14)$$

وقتی که هیچ همبستگی بین ورودی نوفه وجود ندارد،  $S_{fn}(\omega) = 0$  و تابع انتقال  $S_{fx^*}(\omega) = S_{fx}(\omega)$  بدون هیچ اثری از خطا به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$H_s(\omega) = S_{fx}(\omega) / S_{ff}(\omega) \quad (\text{الف-}15)$$

به همین قیاس، اگر اندازه‌گیری ورودی  $F$  دارای اثر نوفه‌ای باشد و اگر هیچ همبستگی با خروجی نداشته باشد، در این صورت تابع انتقال به صورت زیر است:

$$H_r(\omega) = S_{xx}(\omega) / S_{xf}(\omega) \quad (\text{الف-}16)$$

همچنین، اگر هیچ خطایی در داده‌های اندازه‌گیری شده نباشد، معادلات (الف-۱۱)، (الف-۱۵) و (الف-۱۶) یکسان خواهند بود:

$$\begin{aligned} H_s(\omega) &= S_{fx}(\omega) / S_{ff}(\omega) = \gamma_{sf} \\ H_r(\omega) &= S_{xx}(\omega) / S_f(\omega) \end{aligned} \quad (\text{الف-}17)$$

و این همدوسی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و با رابطه بین محصول درونی بزرگی از صفر تا ۱ در نظر گرفته می‌شود. اگر هیچ نوفه‌ای وجود نداشته باشد، برآورده  $H_1$  و  $H_2$  همان مقدار را کسب می‌کند و همدوسی برابر یک است. پس همدوسی به عنوان یک شاخص اطمینان برای داده‌های اندازه‌گیری شده به کار می‌رود. به طور کلی،  $H_1$  به عنوان یک برآورده تابع انتقال به کار می‌رود.

وقتی که، تابع انتقال از داده‌های اندازه‌گیری شده بدست نمی‌آید، توصیه می‌شود که از نسبت طیف‌های عرضی و نه نسب بین طیف‌های فوریه استفاده شود.

### الف-۳ محاسبه تابع انتقال با تحلیل

معادلات حرکت درجه  $n$  آزادی به صورت زیر می‌باشد:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad (\text{الف-}18)$$

با اعمال تبدیل فوریه به هر دو طرف معادله، داریم:

$$[-\omega^T M + i\omega C + K]X(\omega) = F(\omega) \quad (\text{الف-}19)$$

تابع انتقال بین پاسخ جابه‌جایی و یک تحریک خارجی به صورت زیر می‌باشد:

$$H(\omega) = [-\omega^T M + i\omega C + K]^{-1} \quad (\text{الف-}20)$$

برآورده مستقیم تابع انتقال با محاسبه ماتریس معکوس فوق امکان‌پذیر است. اما بسامد هر مد و سهیم بودن آن، با محاسبه مستقیم بدون وضوح می‌شود. بنابراین برای به دست آوردن تابع انتقال در فضای یا مدلی، توصیه می‌شود. فرمول بندی تابع انتقال یک سیستم میرایی نامتناسب به صورت یک مثال توضیح داده

می‌شود. اگر پل دارای وسیله‌های میراگر یا ایزولاتور باشد، در این صورت سازه، یک سیستم میرای نامتناسب در نظر گرفته می‌شود. پس استفاده از تحلیل سیستم‌های میرایی نامتناسب، برای شناسایی مستقیم کامل پل ضروری است.

با تبدیل متغیرهای معادله (الف-۱۸)، یک معادله دیفرانسیل معمولی متقابن بدست می‌آید:

$$A\dot{z} + Bz = g \quad (\text{الف-۲۱})$$

که در آن:

$$A \begin{bmatrix} C & M \\ m & \cdot \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} K & \cdot \\ \cdot & \cdot M \end{bmatrix}, \quad z \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}, \quad g = \begin{Bmatrix} f \\ \cdot \end{Bmatrix}$$

حل محاسبه مقدار مشخصه طرف چپ معادله (الف-۲۱) با توسط مقادیر مشخصه مرکب و بردارهای ویژه درجه  $2N$  ام ارائه می‌شود و این‌ها ترکیبی از مقادیر مزدوج درجه  $N$  هستند. مقادیر مشخصه ممکن است به صورت  $S_j$  برای  $j = 1, 2, \dots, N$  و  $\lambda_j^*$  مرتب شوند. بردارهای خاص نیز به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$V_j = \begin{Bmatrix} \phi_j \\ S_j \phi_j \end{Bmatrix}, \quad V_{j+N} = \begin{Bmatrix} \phi_j^* \\ S_j \phi_j^* \end{Bmatrix} \quad (\text{الف-۲۲})$$

که در آن صورت  $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N\}^T$  می‌باشد.

در این محاسبه، تعداد معنی‌داری از مقادیر مشخصه یا مقادیر ویژه و شکل‌های نمایی برای  $N$  برای  $S_j$  و  $\lambda_j$  برای یک سیستم درجه  $N$  می‌باشند. بسامد و میرایی نمایی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\omega_j = lm(S_j) \quad (\text{الف-۲۳})$$

$$\zeta_j = -\frac{-\operatorname{Re}(S_j)}{\operatorname{Im}(S_j)} \quad (\text{الف-۲۴})$$

با نرمال کردن بردارهای خاص  $v_j$  برای ماتریس  $A$ ، عنصر  $jk$  معادله (الف-۲۰) به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$H_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{\phi_{jr} \phi_{kr}}{i\omega - S_r} + \frac{\phi_{jr}^* \phi_{kr}^*}{i\omega - S_r^*} \right) \quad (\text{الف-۲۵})$$

اگر سیستم، یک سیستم نامتناسب میرا در نظر گرفته شود در این صورت شکل‌ها مدد، اعداد حقیقی هستند و داریم:

$$H_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\gamma \phi_{jr} \phi_{kr} (i\omega + \zeta_r \omega_r)}{-\omega^2 + 2i\zeta_r \omega_r \omega + \omega_r^2} \quad (\text{الف-۲۶})$$

## پیوست ب

### (اطلاعاتی)

#### شناسایی مشخصه‌های ارتعاش

##### ب-۱ روش مددمنفرد

با فرض اینکه اثر کوپلینگ بین مدهای مختلف، کوچک است و با در نظر گرفتن به این که سیستم عبارت از مجموع سیستم‌های دارای درجه یک از درجه آزادی است، بسامدها و ضرایب میرایی برای هر مد بدست می‌آید. برای شناسایی اوج تابع انتقال با تطبیق آن مقادیر سیستم‌های 1-DOF، روش تطبیق منحنی مفید خواهد بود. اگر سیستم دارای بسامدها با گستردگی نزدیک به هم باشد، بهتر است شناسایی در یک سیستم دارای چند درجه آزادی M-DOF انجام شود.

توصیه می‌شود از روش نیمه توان اعمال شده بر اوج تابع انتقال استفاده شود و از روش تطبیق منحنی اعمال شده بر گستره وسیعی از تابع انتقال استفاده شود.

##### ب-۲ روش کمترین مجددرات

به منظور شناسایی بسامد طبیعی، میرایی و شکل‌های مد در دامنه بسامدی، شناسایی این پارامترها از تابع انتقال برای تطبیق با تابع انتقال اندازه‌گیری شده انجام می‌شود. برای تطبیق تابع انتقال اندازه‌گیری شده ( $H_m$ ) با تابع انتقال فرضی یک سیستم میرایی نامتناسب، (۱)، برای هر دو بخش حقیقی و فرضی، تابع ارزشیابی زیر با تغییر مقادیر فرضی بسامد و میرایی، حداقل شده است:

$$E = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left[ \operatorname{Re} (H_m - H_c)^\dagger + \operatorname{Im} (H_m - H_c)^\dagger \right] W(\omega) d\omega \quad (1)$$

گستره  $\omega_1$  تا  $\omega_2$ ، گستره بسامد شناسایی، و  $W(\omega)$  تابع وزنی است که مسئول افزایش مقادیر ناشی از پالایش بین گذر در گستره بسامدی است.

## پیوست پ

### (اطلاعاتی)

#### مدل سازی بار پیاده روی

با به حساب آوردن اثر هر دو گام راست و چپ پیاده روی، بار پیاده روی ( $f(t)$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:  
(به کتابنامه [۷] مراجعه شود):

$$f(t) = \frac{P}{M} \phi(\omega_0 f_0) \sin \omega_0 t \quad (\text{پ-1})$$

که در آن:

$P$  دامنه نیروی ضربه‌ای است؛

$M$  جرم تعمیم یافته برای مد اساسی است؛

$\phi$  شکل مد اساسی نرمال شده است؛

$\omega_0$  عرض گام به متر است؛

$f_0$  پایین‌ترین بسامد طبیعی پل است؛

$\theta$  بسامد زاویه‌ای پل بر حسب رادیان در ثانیه است؛

$t$  زمان است.

بار پیاده روی ( $f(t)$ ) به عنوان یکتابع نیمه سینوسی با نادیده گرفتن بار منفی یک گام به صورت زیر تعریف شده است: (به کتابنامه [۲۴] مراجعه شود):

$$f(t) = F \sin \frac{\pi t}{T_c} \quad (\text{پ-2})$$

که در آن:

$F$  وزن بدن پیاده روی کننده بر حسب نیوتون است؛

$T_c$  زمان تماس یک گام است؛

$T$  زمان است.

بار پیاده روی ( $f(t)$ ) با یکتابع نیمه کسینوسی، برای یک بار مثبت نیز تعریف شده است: (به کتابنامه [۱۷] مراجعه شود):

$$f(t) = \alpha W \cos 2\pi ft \quad (\text{پ-3})$$

که در آن:

$\alpha$  ضریب تقویت بار است؛

$W$  وزن بدن بر حسب نیوتون است؛

$F$  بسامد پیاده روی است.

این معادلات نشانگر تغییرات زمانی فشار پا بر پل است. با در نظر گرفتن سرعت و محل، بار پیاده روی به صورت متحرک در طول پل در نظر گرفته شود.

## كتابات مه

- [1] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements
- [2] ISO 2631-4, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems
- [3] ISO 8608, Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data
- [4] ISO 13374-1, Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation — Part 1: General guidelines
- [5] ISO 13822, Bases for design of structures — Assessment of existing structures
- [6] BS 5400-2, Steel, concrete and composite bridges — Specification for loads
- [7] BLANCHARD, J., DAVIS, B.L. and SMITH, J.W. Design criteria and analysis for dynamic loading of foot-bridges. Proceedings of Symposium of Dynamic Behaviour of Bridges, Supplementary Report 27, UK TRRL, 1977, pp. 99-106
- [8] CANTIENI, R. Dynamische Belastungsversuche an Straßenbrücken in der Schweiz. 60 Jahre Erfahrung der EMPA. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), Massivbau, Bericht Nr. 116/1, 1983
- [9] CANTIENI, R. Dynamic load testing of highway bridges. IABSE Proceedings, P-75/84, 1984, pp. 57-72
- [10] CANTIENI, R. Dynamische Belastungsversuche an der Bergspurbrücke Deibüel. Teil A, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), Massivbau, Bericht Nr. 116/4A, 1988
- [11] CHAN, P.W. and ROBERTSON, L.E. Human perception thresholds of horizontal motion. Journal of the Structural Division ASCE, 98, No. ST8, 1972, pp. 1681-1695
- [12] COLE, H.A. On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures. NASA CR-2205, 1973
- [13] DALLARD, P. et al. The London Millennium Footbridge. Structural Engineering, 79, No. 22, 2001

- [14] FUJINO, Y., et al. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 1993, pp. 741-758
- [15] HARRIS, C.M. and CREDE, C.E. *Shock and vibration handbook*, 2, McGraw-Hill Book Company, 1961
- [16] HONDA, H., KAJIKAWA, Y. and KOBORI, T. Spectra of road surface roughness on bridges. *Journal of Structural Division, Proc. of ASCE*, 108, No. ST9, 1982, pp. 1956-1966
- [17] KAJIKAWA, Y. Some considerations on ergonomical serviceability analysis of pedestrian bridge vibration, *Proc. of JSCE*, No. 325, 1982, pp. 23-33
- [18] KAWATANI, M., NISHIYAMA, S. and YAMADA, Y. Dynamic analysis of highway girder bridges under moving vehicles. *Proc. of 4th Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Seoul, 1993, pp. 1857-1862
- [19] KAWATANI, M. and KIM, C.-H. Effects of gap at expansion joint on traffic-induced vibration of highway bridges. *Proc. of 5th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Calgary, Canada, 1998, pp. 285-294
- [20] LJUNG, L. *System identification*, Prentice Hall, 1987
- [21] Ontario Highway Bridge Design Code 1983, Highway Engineering Division, Ministry of Transportation and Communications, OTM, 1983
- [22] PACHECO, B. and FUJINO, Y. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congregated bridge. *Proc. of 6th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, Nevada, USA, 1990, pp. 449-462
- [23] YAO, J.T.P. Damage assessment of existing structures. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, EM 4, 1980
- [26] WHEELER, J.E. Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridges. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 108, No. ST9, 1982, pp. 2045-2065