

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده: عمران و معماری

گروه: سازه

استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل ارتعاش کف
ساختمانهای غیر صنعتی

اساتید راهنما:

آقای دکتر علی کیهانی

آقای دکتر وحیدرضا کلاتجاری

دانشجو: غلامحسین خواجوی فخردادود

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیرماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: عمران و معماری

گروه: سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای غلامحسین خواجوی فخرداد

تحت عنوان:

استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل ارتعاش کف ساختمانهای غیرصنعتی

در تاریخ ۱۳۸۸/۴/۳۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه بسیار خوب (نمره: ۱۷/۸۵) مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	-		آقای دکتر علی کیهانی
	-		آقای دکتر وحید رضا کلاتجاری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	آقای مهندس عباس محمدی		آقای دکتر احمد احمدی
			آقای دکتر بهروز حسینی

تقدیم به:

همسرم که مشوقم در جهت ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد بودند و با قبول سختی های دوران تحصیل ، مرا یاری نمودند و همچنین پسر م که در این مدت نتوانستم وظایفم را در قبالش به خوبی انجام دهم.

تقدیر و تشکر:

قبل از هرسخنی خداوند متعال را سپاسگزارم که به بنده حقیر نعمت صحت و سلامتی عطا فرمود تا بتوانم در این مقطع تحصیلی تلاشی هرچند کوچک در عرصه دانش بشریت داشته باشم تا شاید گره ای از معضلات علمی گشوده و مورد قبول اهل دانش واقع گردد.

در ادامه آنچه پیش رو دارید ایرادها را از آن نگارنده بدانید و باقی ، هرآنچه از صحت و درستی می ماند حاصل و نتیجه راهنماییهای ارزشمند اساتید گرانقدر آقای دکتر کیهانی و آقای دکتر کلاتجاری است که این بنده حقیر مدیون آنها می باشم؛ چراکه بدون تلاش این عزیزان در عرصه آموزش عالی هیچگاه چنین تحقیقاتی به ثمر نخواهد رسید. در ضمن در اینجا لازم می دانم از هموطن گرامی آقای دکتر مهدی ستاره عضو ASCE، ACI و استاد دانشگاه پلی تکنیک ویرجینیا بخاطر همکاری در ارسال مقالاتشان از طریق ایمیل کمال تشکر را داشته باشم. نهایتاً از آقای دکتر احمدی ریاست محترم دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر راهنماییهای ارزشمندشان و توجه به مشکلات دانشجویان کارشناسی ارشد کمال تشکر را می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب غلامحسین خواجهی فخرداد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران- سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در کنترل ارتعاش کف ساختمانهای غیر صنعتی تحت راهنمایی آقای دکتر علی کیهانی به عنوان استاد راهنمای اول و آقای دکتر وحید رضا کلاتجاری به عنوان استاد راهنمای دوم متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام >> دانشگاه صنعتی شاهرود<< و یا >>shahrood university of technology<< به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.



تاریخ: ۸۸/۴/۳۱

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده :

امروزه در صنعت ساختمان سازی تقاضای فزاینده ای در استفاده از کف ها ی باز(عاری از ستون و دیوارهای داخلی) ضمن استفاده از مصالح سبک و با مقاومت بالا وجود دارد. در نتیجه در اثر فعالیتهای انسانی از قبیل راه رفتن و آبرویک ارتعاشات زیادی در این نوع کف ها رخ خواهد داد.

در این تحقیق موضوع کنترل ارتعاش کف های غیر صنعتی در اثر فعالیتهای انسانی مورد بررسی قرار می گیرد. یکی از روشهای کنترلی در کاهش ارتعاشات کف ها استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD)¹ می باشد. در این تحقیق ابتدا تئوری ریاضی برای سیستم های یک تا چند درجه آزادی مجهز به TMD ارائه و سپس پارامترهای بهینه طراحی آن در قالب فرمولها و نمودارهایی بیان می گردد. جهت مدلسازی TMD و کف های کامپوزیت بتنی و فولادی از برنامه اجزای محدود SAP2000² و همچنین از تحلیل مودال و دینامیکی تاریخچه زمانی (THA)² آن استفاده شده که در این راستا تکنیک ها و نکات مدلسازی آن مطرح شده است.

در ادامه کاربرد عملی میراگرهای جرمی تنظیم شده برای کف پل عابر پیاده و اداره الکترونیکی (اداره فاقد سیستم سنتی بایگانی و...) بررسی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از کاهش بالای پنجاه درصد در شتاب اوج کفهای مذکور است.

¹ Tuned Mass Dampers

² Time History Analysis

در یک مثال دیگر کاربرد TMD در کاهش ارتعاشات کف یک سالن ورزش کشتی مطالعه گردید. نتایج حاصله در این مورد دلالت دارد که TMD در کاهش ارتعاشات این کف مقرون به صرفه نبوده ولی استفاده از آن موفقیت آمیز است و در نتیجه می تواند در بهبود ارتعاش سالنهای موجود بکار برود. هنگام مدلسازی به روش اجزای محدود، این نتیجه حاصل شد که دقت خوبی بین فرکانس اساسی حاصل از تحلیل مودال در مقایسه با روش حل دستی مطابق راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا وجود دارد اما در مورد شتاب اوج کف نتایج برهم منطبق نیستند و خطایی وجود دارد که می بایست مدنظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی:

میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD)، ارتعاش کف ها ، کف های کامپوزیت، فرکانس اساسی ، شتاب اوج ، تحلیل مودال، تحلیل تاریخچه زمانی (THA)

فهرست مطالب

تقدیر و تشکر..... ۵

چکیده..... ۱۰

فهرست مطالب..... ۱۰

فهرست اشکال..... ۱۰

فهرست جداول..... ۱۰

فصل ۱ مقدمه..... ۱

فصل ۲ مرور مطالعات انجام شده..... ۶

۱-۲ تعاریف و مفاهیم..... ۷

۲-۲ ارتعاشات کف: مرور مطالعات انجام شده..... ۱۲

۳-۲ میراگرها: مرور مطالعات انجام شده..... ۱۷

۱-۳-۲ کنترل غیرفعال..... ۱۸

۲-۳-۲ کنترل نیمه فعال..... ۲۸

۳-۳-۲ کنترل فعال..... ۳۰

فصل ۳ ضوابط طراحی کف های مرتعش ۳۲

۳-۱ مقدمه ۳۳

۳-۲ ضوابط طراحی ارتعاش مطابق راهنمای طراحی ۳۳

۳-۲-۱ ارتعاش کف برای فعالیت مرتبط با راه رفتن ۳۴

۳-۲-۲ ارتعاش کف بعلت فعالیت های هماهنگ ۴۶

۳-۳ مدل سازی بروش اجزای محدود ۵۱

۳-۳-۱ برنامه رایانه ای اجزای محدود ۵۱

۳-۳-۲ نحوه استفاده از الزام محدود ۵۲

۳-۴ بارگذاری دینامیکی معادل راهنمای طراحی ۵۶

۳-۴-۱ بارگذاری دینامیکی برای فعالیت راه رفتن ۵۶

۳-۴-۲ بارگذاری دینامیکی برای فعالیت های هماهنگ ۵۷

فصل ۴ تئوری TMD ۵۸

۴-۱ مقدمه ۵۹

۴-۲ تئوری TMD برای سیستم یک درجه آزادی ۶۰

۴-۲-۱ سیستم بدون میرایی - TMD بدون میرایی ۶۰

۴-۲-۲ سیستم بدون میرایی - TMD با میرایی ۶۳

۴-۲-۳ سیستم با میرایی - TMD با میرایی ۶۸

۴-۳ تئوری TMD برای سیستم چند درجه آزادی ۷۶

فصل ۵ کاربرد عملی TMD ۸۵

۵-۱ کاربرد TMD در پل عابر پیاده ۸۶

۵-۱-۱ طراحی براساس ارضای معیار مقاومت و خیز ۸۷

۵-۱-۲ کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی ۸۸

۵-۱-۳ طراحی پل با نرم افزار SAP2000 و تعیین پارامترهای مودال ۹۰

۵-۱-۴ تعیین بار دینامیکی معادل راهنمای طراحی ۹۳

۵-۱-۵ افزایش سختی برای ارضای ضوابط ارتعاش مطلوب ۹۴

۵-۱-۶ ارتعاش مطلوب با نصب TMD ۹۵

۵-۱-۷ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD ۹۹

۵-۱-۸ نصب چندین TMD معادل با یک TMD ۱۰۱

۵-۲ کاربرد TMD در اداره الکترونیکی ۱۰۳

۵-۲-۱ طراحی براساس ارضای معیار مقاومت و خیز ۱۰۴

۵-۲-۲ کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی ۱۰۸

۵-۲-۳ طراحی کف اداری بانرم افزار SAP2000 ۱۱۰

۵-۲-۴ تعیین بار دینامیکی معادل راهنمای طراحی ۱۱۲

۵-۲-۵ افزایش سختی برای ارضای ضوابط ارتعاش مطلوب ۱۱۴

۵-۲-۶ ارتعاش مطلوب با نصب TMD ۱۱۵

۵-۲-۷ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD ۱۱۶

۳-۵ کاربرد TMD در سالن ورزش کشتی..... ۱۱۸

۱-۳-۵ طراحی براساس ارضای معیار مقاومت و خیز..... ۱۲۰

۲-۳-۵ کنترل ارتعاش..... ۱۲۲

۳-۳-۵ مقایسه نتایج با نرم افزار و تعیین پارامترهای مودال..... ۱۲۵

۴-۳-۵ تعیین بار دینامیکی معادل راهنمای طراحی..... ۱۲۷

۵-۳-۵ افزایش سختی برای کنترل ارتعاش کف..... ۱۲۹

۶-۳-۵ ارتعاش مطلوب با نصب TMD..... ۱۲۹

۷-۳-۵ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD..... ۱۳۷

فصل ۶ نتایج ۱۳۸

ضمیمه الف تعیین بار دینامیکی معادل جهت فعالیت راه رفتن ۱۴۵

ضمیمه ب تعیین بار دینامیکی معادل جهت فعالیت‌های هماهنگ ۱۴۸

ضمیمه ج فهرست فایل‌های نرم افزار SAP2000 Ver. 11.0.7 ۱۵۱

فهرست منابع ۱۵۴

چکیده انگلیسی ۱۵۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: تابلوی علائم هشدار در توقف رژه سربازان در عبور از پل ها، جهت جلوگیری از تخریب ارتعاشی [۱]..... ۳
- شکل ۱-۲: دامنه و پریود در نمودار پاسخ-زمان..... ۷
- شکل ۲-۲: تاثیر میرایی و اسکوزمودال روی منحنی پاسخ-زمان [۲]..... ۹
- شکل ۳-۲: بارهای دینامیکی (راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا، ۱۹۹۷) [۳]..... ۹
- شکل ۴-۲: طیف شتاب-فرکانس با نمایش فرکانس اساسی کف [۴]..... ۱۰
- شکل ۵-۲: نمونه شکل مودهای بوجود آمده در یک تیروسیستم کف [۳]..... ۱۱
- شکل ۶-۲: مقیاس ریهر-میستر (۱۹۳۱) [۴]..... ۱۳
- شکل ۷-۲: مقیاس اصلاحی ریهر-میستر [۴]..... ۱۴
- شکل ۸-۲: شتاب اوج توصیه شده برای راحتی انسان از ارتعاشات ناشی از فعالیت های انسانی..... ۱۶
- شکل ۹-۲: نصب یک نمونه TMD برای کاهش ارتعاش قائم پل ها [۸]..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲: نمونه دیگری از TMD در پل اسشوت برلین آلمان [۹]..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲: مدل دودرجه آزادی بایک TMD متصل شده به سازه اصلی [۸]..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲: پل فرچه‌ایم آلمان که با TMD در مودهای قائم نصب گردیده است. [۱۰]..... ۲۳
- شکل ۱۳-۲: نمای طولی پل فرچه‌ایم آلمان..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲: مقطع عرضی پل فرچه‌ایم آلمان از محل TMD نصب شده در مود قائم [۱۰]..... ۲۴
- شکل ۱۵-۲: جزئیات میراگر تنظیم شده جرمی پاندولی (PTMD) [۷]..... ۲۵

- شکل ۲-۱۶: جرئیات نصب مصالح ویسکوالاستیک (VEM) در کف کامپوزیت جهت افزایش میرایی [۷]..... ۲۷
- شکل ۲-۱۷: بزرگنمایی میراگر MR نوع نیمه فعال [۱۱]..... ۲۹
- شکل ۳-۱: میانگین ترسیم نیرو-زمان برای ضربه پای استاندارد [۶]..... ۳۴
- شکل ۳-۲: پاسخ کف نمونه به ضربه پاشنه پا (با حذف فرکانس های بالاتر) [۶]..... ۳۵
- شکل ۳-۳: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت عدم وجود حداقل اجزای غیرسازه ای از قبیل سقف کاذب، داکت ها و پارتیشن ها [۱۲]..... ۳۷
- شکل ۳-۴: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت وجود حداقل اجزای غیرسازه ای از قبیل سقف کاذب، داکت و پارتیشن ها [۱۲]..... ۳۸
- شکل ۳-۵: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت وجود اجزای غیرسازه ای مثل سقف کاذب، پارتیشن های قابل برداشتن، همراه با قفسه های کتاب و کمد های پر [۱۲]..... ۳۸
- شکل ۳-۶: مقدار میرایی مودال (β) کاربری اداری [۱۲]: ۳۹
- شکل ۳-۷: خیزهای خمشی مودال برای تیرو تیر اصلیها با اتصال صلب به ستونها [۳]..... ۴۵
- شکل ۳-۸: ارتعاش در یک کف با فرکانس ۶/۷ هرتز بعلت فعالیتهای آبروبیک با فرکانس ۲/۲۵ هرتز [۶] ۴۶
- شکل ۳-۹: استفاده از گره ها در تعریف سیستم مختصات محلی المان تیر در مدل SAP2000 [۱۳] ... ۵۲
- شکل ۳-۱۰: المان شل چهار گره ای چهار ضلعی SAP2000 در مدل سازی دال بتنی [۱۳]..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱: مدل کف کامپوزیت با تیرهای نورد شده و دال بتنی که با المان ارتباطی صلب متصل شده [۲]..... ۵۴

- شکل ۳-۱۲: لنگرونیروهای درونی روی گره ها در المان ارتباطی (لینک) [۱۳] ۵۴
- شکل ۳-۱۳: نمونه قیود گره ای در مدل سه بعدی [۲] ۵۵
- شکل ۴-۱: سیستم یک درجه آزادی مجهز به TMD, [۱۵] ۶۰
- شکل ۴-۲: مدل سیستم یک درجه آزادی فاقد میرایی مجهز به TMD با میرایی [۱۵] ۶۴
- شکل ۴-۳: سیستم یک درجه آزادی با میرایی و TMD با میرایی [۱۵] ۶۸
- شکل ۴-۴: ضرایب بزرگنمایی دینامیکی حداکثر برای سیستم یک درجه آزادی با میرایی [۱۵] ۷۲
- شکل ۴-۵: ضرایب بزرگنمایی دینامیکی حداکثر برای TMD [۱۵] ۷۳
- شکل ۴-۶: نسبت دامنه حداکثر TMD به دامنه حداکثر سیستم [۱۵] ۷۳
- شکل ۴-۷: نسبت فرکانس تنظیم شده بهینه برای TMD و f_{opt} [۱۵] ۷۴
- شکل ۴-۸: نسبت میرایی بهینه TMD [۱۵] ۷۴
- شکل ۴-۹: رابطه نسبت میرایی معادل TMD و جرم نسبی با میرایی موجود سیستم [۱۵] ۷۵
- شکل ۴-۱۰: سیستم ۲ درجه آزادی با TMD [۱۵] ۷۶
- شکل ۵-۱: مقطع عرض پل عابر پیاده بصورت کاملاً کامپوزیت ۸۶
- شکل ۵-۲: مقطع تبدیل یافته به فولاد در طراحی براساس مقاومت در پل عابر پیاده ۸۷
- شکل ۵-۳: مقطع تبدیل یافته به فولاد در کنترل ضوابط ارتعاش در پل عابر پیاده ۸۹
- شکل ۵-۴: مود اول پل عابر پیاده با فرکانس طبیعی ۵/۰۲ هرتز ۹۱
- شکل ۵-۵: مود دوم پل عابر پیاده با فرکانس طبیعی ۹/۷۳ هرتز ۹۱
- شکل ۵-۶: مود سوم پل عابر پیاده با فرکانس طبیعی ۱۹/۰۴ هرتز ۹۲

شکل ۷-۵: نمودار پاسخ شتاب - زمان برای باردینامیکی شبیه سازی شده برای فعالیت راه رفتن در

پل عابر پیاده قبل از نصب TMD..... ۹۴

شکل ۸-۵: نمودار شتاب-زمان پل عابر پیاده پس از نصب TMD سازگار با مود اول با $\bar{m} = 0.01 = 1\%$ ۹۸

شکل ۹-۵: نمودار شتاب-زمان پل عابر پیاده پس از نصب TMD سازگار با مود اول با $\bar{m} = 0.02 = 2\%$ ۹۸

شکل ۱۰-۵: مقایسه نمودار شتاب - زمان قبل و بعد از نصب TMD در نمونه پل عابر پیاده با $\bar{m} = 0.01$

..... ۱۰۰

شکل ۱۱-۵: نصب TMD برای ممانعت از لرزش جانبی و عمودی در پل هزاره اول لندن [۹]..... ۱۰۰

شکل ۱۲-۵: نمونه کف اداری الکترونیکی امروزی دارای مشخصات ذیل:..... ۱۰۳

شکل ۱۳-۵: نمونه پلان تیرریزی کف ساختمان اداری امروزی با فضاهای باز و فواصل زیاد ستونها

از هم در مقایسه با ساختمانهای سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ میلادی [۲۲]..... ۱۰۴

شکل ۱۴-۵: مقطع عرضی کف ساختمان اداره الکترونیکی (شکل ۵-۱۳)..... ۱۰۴

شکل ۱۵-۵: مقطع عرضی تبدیل یافته فولاد مربوط به تیر فرعی کف اداره الکترونیکی در معیار مقاومت

..... ۱۰۵

شکل ۱۶-۵: مقطع کامپوزیت تیر اصلی کناری در کاربری اداری با عرض موثر دال بتنی..... ۱۰۶

شکل ۱۷-۵: شکل مود اول ارتعاش کف اداری با فرکانس ۴/۰۴ هرتز..... ۱۱۱

شکل ۱۸-۵: شکل مود دوم ارتعاش کف اداری با فرکانس ۶/۶۳ هرتز..... ۱۱۱

شکل ۱۹-۵: شکل مود سوم ارتعاش کف اداری با فرکانس ۸/۸۶ هرتز..... ۱۱۲

شکل ۵-۲۰: پلان معماری کف سالن ورزش کشتی دریکی از طبقات ساختمان خانه کشتی شهرداری

..... ۱۱۹

شکل ۵-۲۱: پلان تیرریزی کف سالن ورزش کشتی طبق آکس بندی پلان معماری..... ۱۱۹

شکل ۵-۲۲: مقطع عرضی کف سالن ورزش کشتی در مرحله طراحی با کنترل معیار مقاومت..... ۱۲۰

شکل ۵-۲۳: مقطع عرض تبدیل یافته تیرفرعی در کاربری سالن ورزش کشتی در طراحی براساس

معیار مقاومت..... ۱۲۰

شکل ۵-۲۴: مقطع عرض تبدیل یافته تیر اصلی در کاربری سالن ورزش کشتی در طراحی براساس

معیار مقاومت..... ۱۲۱

شکل ۵-۲۵: شکل مود اول کف سالن ورزش کشتی با فرکانس ۳/۹۰ هرتز..... ۱۲۶

شکل ۵-۲۶: شکل مود دوم کف سالن ورزش کشتی با فرکانس ۴/۰۶ هرتز..... ۱۲۶

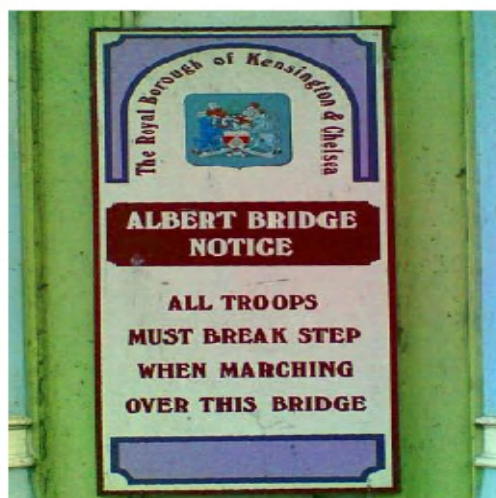
فهرست جداول

- جدول ۱-۳: مقادیر توصیه شده پارامترها در رابطه ۱-۲ و حدود شتابهای کف بعثت راه رفتن [۳]..... ۳۷
- جدول ۲-۳: پارامترهای پیشنهادی طراحی برای فعالیتهای هماهنگ [۶]..... ۴۹
- جدول ۳-۳: حدود شتاب مطلوب برای ارتعاش ناشی از فعالیتهای هماهنگ [۶]..... ۵۰
- جدول ۴-۳: حداقل فرکانس طبیعی کف توصیه شده با احتساب وزن ساکنین [۶]..... ۵۰
- جدول ۱-۵: مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی..... ۱۳۴
- جدول ۲-۵: ادامه مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی..... ۱۳۵
- جدول ۳-۵: ادامه مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی..... ۱۳۶

فصل ۱ مقدمه

پیشرفت های رایج در تکنولوژی و شیوه های مدرن ساختمان سازی تاثیر متضادی در رفتار دینامیکی سازه ای کف ها داشته است. از مشخصات بارز طراحی ساختمانهای قرن ۲۱؛ مقاومت بالای مصالح و استفاده از دهانه های طویل در ترکیب با کف های سبک می باشد. هر چند ارتعاشات، روی مقاومت سازه ای کف ها تاثیری نمی گذارد با این حال در نتیجه کاهش میرایی، سختی و جرم، ارتعاش وجود خواهد داشت و ساکنین ممکن است احساس ناامنی و اضطراب به علت لرزش بیش از حد کف ها داشته باشند که می تواند اساساً قابلیت بهره برداری از ساختمان را زیر سوال برد و چه بسا موجب تخریب کف ها شوند. به عنوان نمونه در سال ۱۸۳۱ در اثر رژه سربازان از روی یک پل چدنی که به تخریب پل مذکور انجامید سبب شد که از آن پس تابلوهای هشدار برای نحوه عبور سربازان بر روی پل ها نصب گردد (شکل ۱-۱). همچنین تخریب سکوهای تماشاچی استادیوم ها در اثر پایداری همآهنگ گزارش شده است. [۱] امروزه در بیشتر ادارات بویژه ادارات الکترونیکی بعلاوه حساسیت کار با رایانه ها ارتعاشات کف ها بسیار مهم می باشند. در واقع بدون کاغذ، کف اداره الکترونیکی در مقایسه با ادارات قدیمی که حاوی فایل های حجیم، میزها و قفسه های سنگین کتابها می باشند، سبک تر و دارای میرایی کمتری است. علاوه بر اینها جانمایی های کف های جدید اداری بصورت فضا های باز، با پارتیشن های متغیر و به فواصل زیاد و همچنین پارتیشنهایی با قابلیت جابجایی، یا در بعضی حالات کلاً بدون پارتیشن می باشند. بهسازی کف هایی که مستعد ارتعاشات ناشی از ساکنین است مستلزم صرف هزینه و صعوبت زیاد است. لذا در مرحله طراحی، پیش بینی رفتار ارتعاشی کف ها امری لازم است و در این خصوص یک سری معیارها و استانداردهای طراحی برای پیش بینی پاسخ سیستم های کف بتدریج توسعه یافته اند. با این وصف چنانچه در مرحله طراحی، پیش بینی ارتعاش صورت نگرفته باشد می بایست با بکارگیری

روشهای نوین نسبت به بهسازی کف اقدام کرد. یکی از این روشها استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD)^۱ است. البته چنانکه در این پایان نامه اشاره شده استفاده از TMD در مرحله طراحی نیز قابل کاربرد است و صرفه اقتصادی و مزیت های زیادی نسبت به روش افزایش سختی جهت غلبه بر ارتعاش نامطلوب دارد.



Albert Bridge, London

شکل ۱-۱: تابلوی علائم هشدار در توقف رژه سربازان در عبور از پل ها، جهت جلوگیری از تخریب ارتعاشی [۱]

هدف این تحقیق استفاده از میراگرهای تنظیم شده جرمی در کنترل ارتعاشات انواع کف ها می باشد. این پایان نامه مشتمل بر شش فصل می باشد فصل اول شامل مقدمه حاضر، فصل دوم خلاصه ای از سیر تکاملی شکل گیری ضوابط ارتعاش کف می باشد که در انتها نمودارهای حد مطلوب شتاب-فرکانس برای انواع فعالیت های انسانی ارائه می گردد و سپس تاریخچه استفاده از انواع میراگرها در کنترل

^۱ Tuned Mass Dampers

ارتعاشات کف ها بیان می‌گردد که بطور ویژه به استفاده از TMD پرداخته شده و بیان تئوری ریاضی آن به فصل چهارم موكول شده است. در فصل سوم خلاصه ای از ضوابط طراحی ارتعاش کف براساس ((راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا یا بطور خلاصه راهنمای طراحی)) برای انواع کاربری ناشی از فعالیتهای انسانی از قبیل مسکونی، اداری، تجاری، پلهای عابر پیاده، ورزشی (کف های غیر صنعتی) ارائه شده است و به بیان نحوه مدلسازی TMD و کف های کامپوزیت بتنی و فولادی به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار SAP2000 پرداخته خواهد شد که پس از فراگیری فن مدلسازی، نحوه تولید بارهای دینامیکی معادل راهنمای طراحی برای انواع کاربری بیان می شود که در تکمیل این فصل، پیوستهای الف و ب برای اثبات بارهای مذکور ارائه گردیده است.

در فصل چهارم تئوری ریاضی TMD برای سازه های یک درجه آزادی در سه حالت مختلف بررسی شده و روابط و نمودارهایی جهت طراحی بهینه اجزای TMD (نسبت میرایی، جرم، سختی) ارائه گردیده است. سپس با استفاده از روابط تعامد مود ها به تعمیم سیستم یک درجه آزادی برای سیستم های چند درجه آزادی پرداخته شده که با این روش استفاده از روابط و نمودارهای سیستم یک درجه آزادی برای سیستم چند درجه آزادی امکان پذیر خواهد شد.

فصل پنجم به بیان مثالهای عملی کاربرد TMD اختصاص دارد. ابتدا به بیان نحوه طراحی کف از نقطه نظر مقاومت با استفاده از نرم افزار و حل دستی طبق ضوابط آیین نامه فولاد ایران انجام گردیده و سپس به کنترل ارتعاش مطابق ضوابط راهنمای طراحی پرداخته شده است که در صورت عدم ارضای ضوابط ارتعاش، به روش افزایش سختی یا استفاده از TMD تقویت سازه ای صورت می گیرد و این دو روش به تفصیل با هم مقایسه شده و نتایج عددی آن ذکر گردیده است.

اولین مثال کاربرد TMD در یک پل عابرپیاده در فضای خارجی می باشد. در واقع هدف از ارائه این مثال بررسی ساده ترین نوع کف بوده و از طرفی فهم دقیق آن، گامهای طراحی را بوضوح بیان نماید.

در مثال بعدی به بیان کاربرد TMD در اداره الکترونیکی امروزی (اداره ای فاقد کاغذ، فایل و پارتیشن) پرداخته شده است. با پیشرفت و گسترش رایانه ها به این نوع فضاهای الکترونیکی روز به روز افزوده می گردد و لازم است ادارات قدیمی بهسازی گردند و همچنین با توجه به میرایی کم این کف ها می بایست مهندسین محاسب در طراحی این فضاها دقت عمل بیشتری داشته باشند.

مثال سوم مربوط به کاربرد TMD در سالن ورزش کشتی می باشد. هدف از انتخاب کاربری مذکور این است که در این حالت نوع فعالیت (برعکس مثالهای قبلی) از نوع فعالیتهای هماهنگ می باشد که امروزه کاربرد زیادی در طراحی سالنهای ورزشی و سالنهای آیروبیک دارد. لازم بذکر است در این کف (برعکس اتصال ساده کف به ستونها در دو مثال قبلی) بجهت دقت و انطباق با واقعیت، اثر ستونها با اتصال صلب به کف در مدل سازی گنجانده شده و بر همین اساس شکل مودها با احتساب اثر ستونها بدست آمده است.

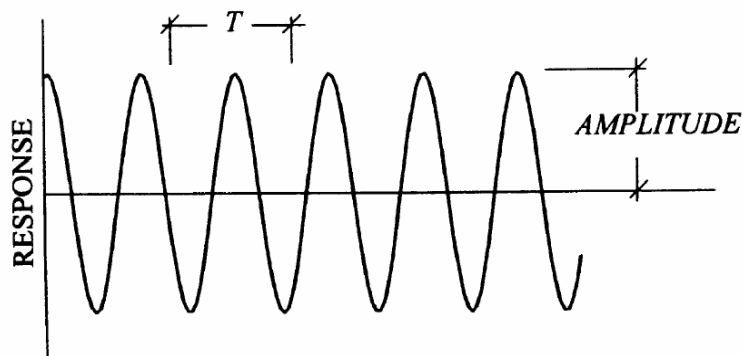
فصل ۲ مرور مطالعات انجام شده

۱-۲ تعاریف و مفاهیم

غالباً در متن از اصطلاحات ارائه شده در زیر استفاده می شوند.

ارتعاش: ارتعاشات، حرکات متناوب از یک جسم الاستیک مثل سیستم کف به صورت یک درمیان درجهت های مخالف از وضعیت تعادل می باشند. ارتعاشات کف می تواند بصورت آزاد یا اجباری طبقه بندی شوند. ارتعاش آزاد هنگامی رخ می دهد که سیستم کف آزادانه جابه جا می شود و در فرکانس طبیعی مرتعش شود. ارتعاش اجباری هنگامی رخ می دهد که سیستم کف در یک فرکانس بوجود آمده بصورت تحریک مستمر دینامیکی مرتعش شود.

چرخه (سیکل): حرکتی که پس از یک نوسان کامل به وضعیت اولیه برمی گردد و سپس این حرکت بطور منظم تداوم دارد.



شکل ۱-۲: دامنه و پریود در نمودار پاسخ-زمان

دامنه: مقداری از حرکت ارتعاشی اندازه گیری شده از موقعیت میانگین تا انتهاست. دامنه برای شتابهای کف در سرتاسر متن غالباً تحت عنوان درصد شتاب جاذبه بیان می شود (شکل ۱-۲).

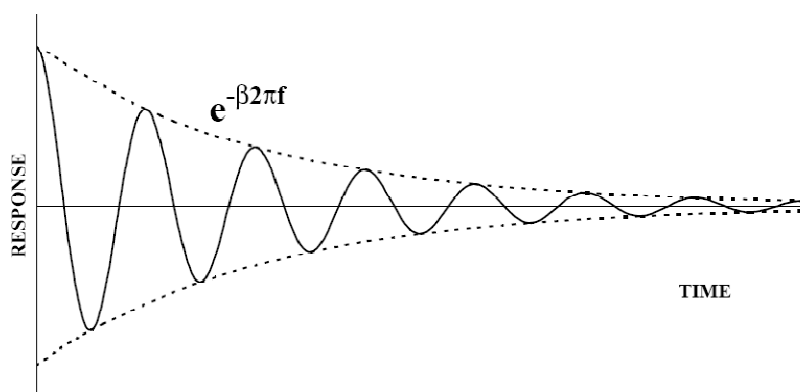
پریود: پریود (T) فاصله زمانی لازم برای تکمیل یک چرخه در یک حرکت نوسانی است. و بر حسب ثانیه اندازه گیری می شود (شکل ۲-۱).

بسامد (فرکانس): معکوس پریود است یا تعداد سیکل ها که در واحد زمان رخ می دهد.

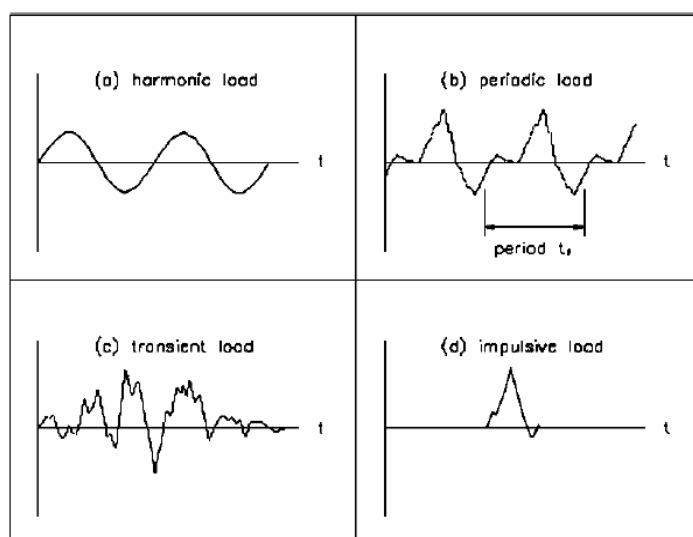
فرکانس به هرتز (HZ) یا تعداد سیکل ها در ثانیه بیان می شود. فرکانس های طبیعی در مدت ارتعاش آزاد یک سیستم رخ می دهد و دامنه قابل توجهی دارد. فرکانس طبیعی اساسی، کمترین فرکانس طبیعی سیستم کف می باشد.

میرایی : پروسه ای که بعلت اتلاف انرژی مکانیکی در ارتعاش یک سیستم کف، دامنه آن کاهش می یابد. میرایی که متناسب با سرعت است میرایی ویسکوز نامیده می شود. میرایی بحرانی، حداقل میرایی ویسکوز لازم برای جلوگیری از نوسان سیستم است. میرایی به عنوان درصدی از میرایی بحرانی بیان می شود که در سراسر متن با حروف ξ, β بیان می گردد. میرایی معمولاً با تقسیم میرایی واقعی بر میرایی بحرانی به درصد بیان می شود. میرایی کاهش لگاریتمی، لگاریتم طبیعی نسبت پیک های متوالی در منحنی پاسخ می باشد (شکل ۲-۲).

در این پایان نامه بیشتر با میرایی مودال سروکار داریم که از میرایی کاهش لگاریتمی کمتر است (حدود یک دوم تا دو سوم آن). میرایی مودال بطور دقیقتر میرایی واقعی سازه را ارائه می نماید.



شکل ۲-۲: تاثیر میرایی ویسکوز مودال روی منحنی پاسخ-زمان [۲]

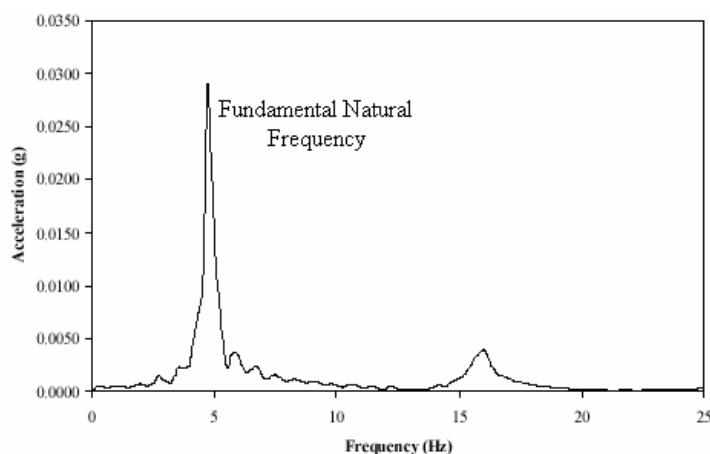


شکل ۲-۳: بارهای دینامیکی (راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا، ۱۹۹۷) [۳]

(a) بار سینوسی (هارمونیک) (b) بار متناوب (c) بار گذرا (d) بار ضربه ای

تشدید (رزونانس): رزونانس حالتی است که در نتیجه تحریک بکاررفته نزدیک یا مساوی ویا مضربی

از فرکانس طبیعی سیستم ، ارتعاشات با دامنه های بزرگ رخ می دهند.



شکل ۴-۲ : طیف شتاب- فرکانس با نمایش فرکانس اساسی کف [۴]

بارگذاری: بارهای دینامیکی تحریکاتی هستند که با زمان تغییر می کنند. بارهای ناشی از تحریکات راه

رفتن بارهای گذراهستند. بارهای بعثت فعالیت‌های هماهنگ انسان بارهای متناوب هستند. بارهای

بعثت ضربه های ناگهانی از قبیل پرش ها ، به بارهای ضربه ای اتلاق می شوند (شکل ۳-۲).

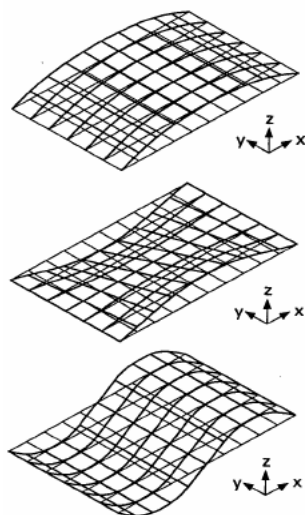
تبدیل فوریه سریع (FFT): FFT یک روش ریاضی برای انتقال یک سری متغیرهای وابسته زمانی

به طیف فرکانس می باشد. برجستگیها در طیف فرکانس موده‌ای متنوع ارتعاش برای یک سیستم کف

را نشان می دهد (شکل ۴-۲).



a) Beam



شکل ۵-۲: نمونه شکل مودهای بوجود آمده در یک تیروسیستم کف [۳]

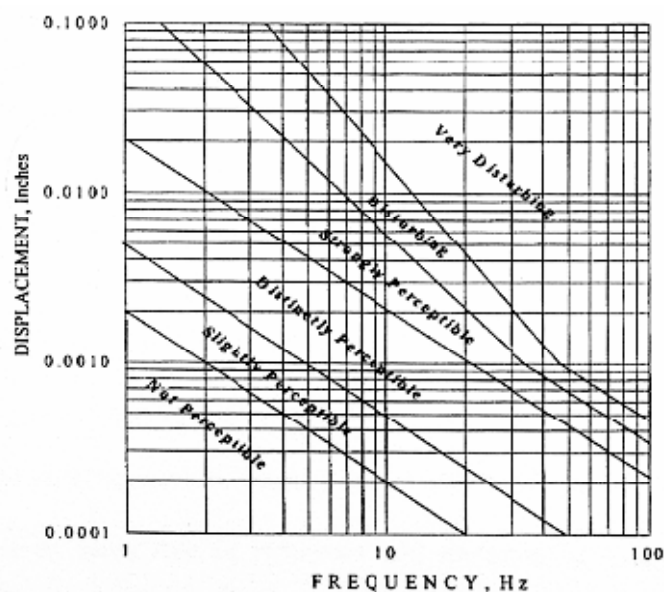
شکل مود: حرکت یک سازه، وقتی که در فرکانس طبیعی ارتعاش میکند شکل مودی را نمایش می دهد. هر شکل مودی فرکانس منحصر به خود را داراست و هر سازه به تعداد درجات آزادی اش شکلهای مودی خواهد داشت (شکل ۵-۲).

۲-۲ ارتعاشات کف: مرور مطالعات انجام شده

اولین معیارسختی برای کف ها توسط تردگلد (۱۸۲۸) ارائه گردید. او بیان نمود بعلت حرکت ساکنین، تیرهای کف باید آنقدر عمیق ساخته شوند که مانع از تکان خوردن هر چیزی در داخل اتاق شوند. در راهنمای طراحی آیین نامه AISC معیارهایی برای غلبه بر ارتعاشات نامطلوب کف ناشی از فعالیتهای انسانی ارائه شده است. [۴]

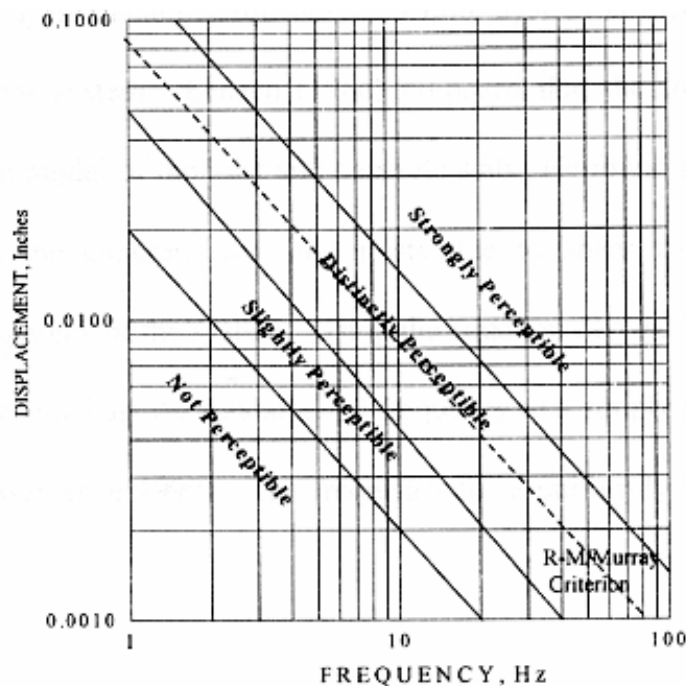
معیار طراحی ارتعاشات کف، براساس کاربرجسته ریهرومیستر^۱ (۱۹۳۱) آغاز شد. تحقیق ریهرومیستر براساس توانایی انسان برای درک حرکت بود. یک گروه انسان در معرض حالت پایدار ارتعاش قرار گرفتند و از میزان مشاهداتشان مورد سوال قرار گرفتند. افراد فرکانس هایی بین ۵ تا ۱۰ هرتز و دامنه هایی بین ۰/۰۰۴ و ۰/۴ اینچ را تجربه کردند. براساس احساس این گروه مقیاسی بدست آمده است. مقیاس با "غیر قابل درک"، "به زحمت قابل درک"، "به وضوح قابل درک"، "به شدت قابل درک"، "مزاحم" و "خیلی مزاحم" طبقه بندی شدند (شکل ۲-۶).

¹ Reiher and Meister



شکل ۲-۶: مقیاس ریهر-میستر (۱۹۳۱) [۴]

لنزن (۱۹۶۶) متوجه شد انسانها کمترین ارتعاشات گذرادر مقایسه با ارتعاشات دائمی حساسند. پس از بررسی، لنزن دریافت وقتی که ارتعاشات گذرای میرا به دامنه های قابل چشم پوشی در مقایسه با دامنه های اولیه در حدود ۵ سیکل حرکت کاهش می یابند فقط تاثیر ضربه اصلی درک می شود. برعکس، چنانچه برای ۱۲ سیکل یا بیشتر ادامه یابد، حالت ارتعاش دائمی قابل درک می باشد. لنزن "مقیاس اصلاحی ریهر و میستر" را با ضرب محور تغییر مکان در ضریب ۱۰ از مقیاس ریهر و میستر بوجود آورد (شکل ۲-۷). لنزن در خاتمه بر اساس این اصلاحیه عنوان کرد که در ارتعاشات گذرا میرایی کافی در کف های نمونه وجود دارد که بزرگی ارتعاشات را محدود خواهد کرد.



شکل ۷-۲: مقیاس اصلاحی ریهر-میستر [۴]

همچنین لنز روشهایی برای تخمین خواص سیستم کف از قبیل سختی، فرکانس و تغییر مکان معرفی نمود.

کار مورای (۱۹۷۵) به پیشرفت بعدی از معیار اصلاحی ریهر-میستر کمک کرد. مورای نتیجه گرفت: سیستم تیر فلزی و دال بتنی (سقف کامپوزیت) با سطوح نسبتاً باز فاقد پار تیشن و دارای میرایی ۴ تا ۱۰٪ که بالای محدوده یک دوم (به وضوح قابل درک) ترسیم می شوند در عمل نارضایتی ساکنین را به دنبال خواهد داشت. خط چین در شکل ۷-۲ ترمیمی به مقیاس اصلاحی ریهر-میستر نشان می دهد. همچنین مورای استفاده از عمق موثر در محاسبات ممان اینرسی تبدیل یافته را توصیه کرد. عمق موثر برای یک دال بتنی در جهت موازی تیر، عمق بتن بالای عرشه فولادی می باشد. و در جهت عمود

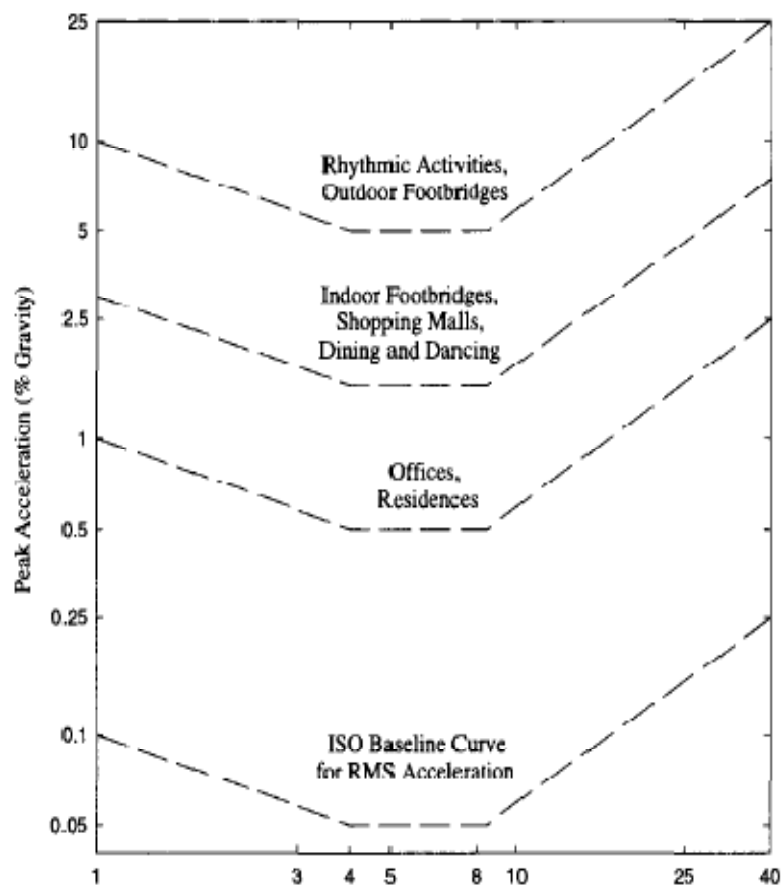
برتیر از جمع عمق بتن بالای عرشه فولادی و یک دوم ارتفاع عرشه فولادی بدست می آید. معیار مورای (۱۹۸۱) با لحاظ کردن یک میرایی بحرانی به عنوان ملزومات قابلیت پذیرش توسط ایشان پیشنهاد شد. معیار مورای براساس حداقل مقدار میرایی لازم جهت داشتن ارتعاش مطلوب در سیستم کف ابداع شد. میرایی لازم تابعی از دامنه و فرکانس طبیعی سیستم بعثت بار استاندارد ضربه پاشنه پا^۱ می باشد. نود و یک سیستم با خواص متغیر بصورت آماری برای معیار مورای مورد تحلیل قرار گرفتند تا میزان میرایی لازم برای یک سیستم قابل پذیرش تعیین شوند. معیار مورای برای سیستم های با فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز و دهانه های کمتر از ۱۲ متر دارای اعتبار می باشد. این معیار طراحی، در نرم افزار ETABS 2000 گنجانده شده است و برای کاربریهای معمول ناشی از فعالیتهای راه رفتن از قبیل مسکونی، اداری، پل عابر پیاده و تجاری کاربرد دارد. جهت جزئیات بیشتر مراجع [۵، ۶] مطالعه شود.

در سال ۱۹۸۹ سازمان استانداردهای بین المللی (Iso) حدودی به اصطلاح ریشه دوم میانگین حسابی توانهای دوم شتاب (rms) به عنوان ضریبی از منحنی های پایه پیشنهاد کرد (شکل ۲-۸).

آلن و مورای (۱۹۹۳) شتابهای اوج برای اداری، مسکونی، فروشگاهها و پلهای عابر پیاده برای معیار طراحی مرتبط با ارتعاشات ناشی از راه رفتن را توصیه کردند.

بعلاوه آلن و مورای تکنیک های نزدیک به طراحی را برای تخمین مشخصات لازم کف براساس تحریکات ناشی از راه رفتن را توسعه دادند. [۴]

¹ Heel Drop Impact



شکل ۲-۸: شتاب اوج توصیه شده برای راحتی انسان از ارتعاشات ناشی از فعالیتهای انسانی

(آلن ومورای، ۱۹۹۳؛ ایزو ۲-۲۶۳۱: ۱۹۸۹) [۳]

بیشترپروژه های استفاده شده در راهنمای طراحی براساس کار آلن ومورای می باشد. راهنمای طراحی متداولترین معیار بکار گرفته توسط مهندسين شمال آمريکا است که توسط مورای، آلن، آنگر (۱۹۹۷) تدوين و در سال ۲۰۰۳ ویرایش شده است. در فصل بعدی بحث کاملتری از این راهنما ارائه خواهد شد.

۳-۲ میراگرها: مرور مطالعات انجام شده

اگرچه قبل از اجرا مهندسان سازه دستورالعمل ها و رهنمود های طراحی برای ارزیابی شتاب کف دارند با این حال هنوز کف هایی وجود دارند که ارتعاشات آنها مطلوب نیستند. چندین گزینه برای اصلاح ارتعاشات نامطلوب کف ها وجود دارد یکی از ارزان ترین گزینه ها جا به جایی منبع ارتعاش می باشد: مثل جابه جایی سالن ورزش به طبقه همکف، جابجایی تجهیزات حساس به مجاورت ستونها یا دیوارها و یا مکانهایی که ارتعاشات کمتری نسبت به وسط دهانه دارند (کو، ۲۰۰۳). [۷]

گزینه دیگر افزایش سختی (تقویت سازه ای) کف می باشد که باعث افزایش فرکانس اساسی کف و در نتیجه باعث کاهش ارتعاشات آن می شود. با این حال در برخی موارد فضای کافی برای این کار وجود ندارد.

گزینه دیگری می تواند افزایش جرم کف باشد به شرط آنکه باعث افزایش تنش ها در المان های سازه ای نشود. از دیگر راهکارهای موثر، افزودن اجزای غیرسازه ای از قبیل ایجاد پارتیشن هایی به ارتفاع کف تا سقف با هدف افزایش میرایی و بعضاً سختی بیشتر کف می باشد که بعلاوه محدودیت های معماری همواره امکان پذیر نخواهد بود (ستاره ۲۰۰۶). [۷]

در نتیجه ، با بکارگیری انواع میراگرهای غیرفعال ، نیمه فعال و فعال می توان در کاهش ارتعاشات کف بهره جست که در ادامه به بررسی هریک پرداخته می شود.

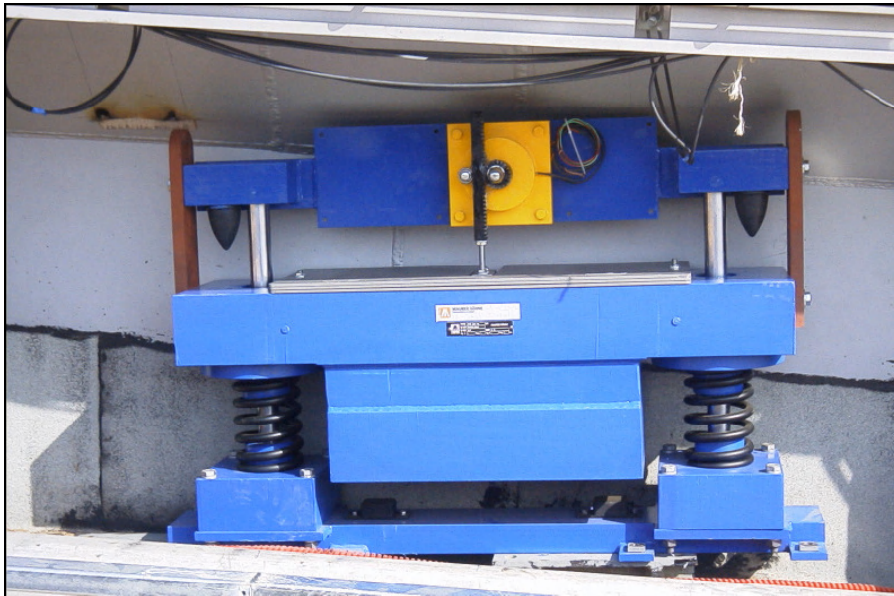
۱-۳-۲ کنترل غیرفعال

۱-۱-۳-۲ میراگر تنظیم شده جرمی

یک میراگر تنظیم شده جرمی (TMD) یا جاذب ارتعاش اساساً نوعی وسیله اتلاف انرژی می باشد که در ساده ترین شکل آن حاوی جرمی است که توسط فنرواجزای میراگر به سازه اصلی متصل می گردد (شکل های ۲-۹ و ۱۰-۱).

هروقت که جرم TMD با تغییر مکان یا سرعت غیر صفر نسبت به سیستم اصلی نوسان می کند آنگاه بعثت وجود میراگر، اتلاف انرژی رخ می دهد. این عمل با انتقال انرژی زیادی از سیستم اصلی به TMD با یک فرکانس تنظیمی دقیق و نسبت میرایی TMD امکان پذیر می باشد.

از آنجایی که جرم TMD به میزان قابل توجهی کمتر از جرم سیستم اصلی می باشد انتقال انرژی از سیستم اصلی به TMD باعث ایجاد نوسان نسبتاً بزرگی در آن می شود. برعکس یک میراگر استاندارد که عموماً اتلاف انرژی زیادی را در یک پهنای باند فرکانسی وسیع میسر ساخته، یک TMD بطور موثر فقط در یک پهنای باند باریکی عمل می کند. این رفتار مربوط به مکانیزم انتقال انرژی از سیستم اصلی به TMD می باشد. [۸]



شکل ۲-۹: نصب یک نمونه TMD برای کاهش ارتعاش قائم پل ها [۸]

انتقال انرژی زیاد هنگامی رخ می دهد که فرکانس طبیعی TMD با فرکانس طبیعی سیستم اصلی کوک شده باشد. بنابراین اگر یک نمونه TMD به سازه متصل شود فقط در یک مود ارتعاشی مشخص موثر می باشد. اگر میرایی چندین مود هدف باشد آنگاه نحوه قرار گرفتن کاملاً پیچیده است (باخمن و همکاران ۱۹۹۵).

مفهوم TMD بدون استفاده از میراگر توسط فراهام در سال ۱۹۰۹ برای کاهش حرکت چرخشی کشتی ها اختراع شد. سالها بعد (۱۹۲۸) اولین تئوری TMD با میراگر توسط آرمندرید و دن هارتوق ارائه گردید.



شکل ۱۰-۲ نمونه دیگری از TMD در پل اسشوت برلین آلمان [۹]

دن هارتوق (Den Hartog, 1947) در یک گراف جزئیات آنالیز پارامترهای بهینه TMD را ارائه کرد.

در آنجا مدلی از سازه اصلی با اتصال TMD بصورت سیستم دودرجه آزادی ارائه شد (شکل ۲-۱۱). [۸]

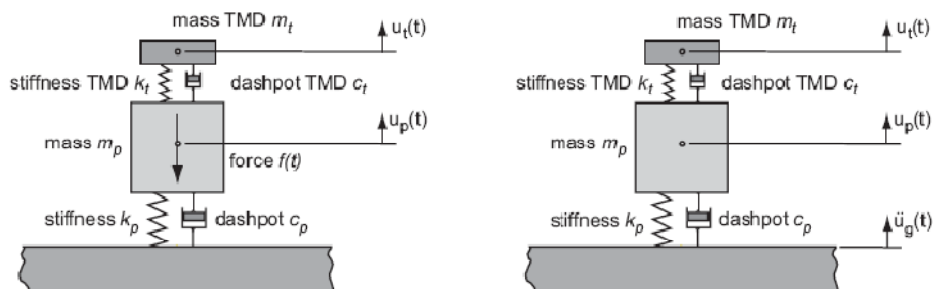
در فصل چهارم به تفصیل تئوری TMD بیان شده است.

می توان کارآمدی TMD تنظیم شده بامود نامطلوب ارتعاش را از نسبت میرایی موثر سیستم کف - TMD تخمین زد.

$$\beta_s = 0.5 \sqrt{m / M} \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق m جرم TMD ؛ M جرم موثر کف در حالت مود ارتعاشی طبیعی است. به عنوان مثال

اگر نسبت جرم (m/M) مساوی $۰/۰۱$ باشد نسبت میرایی موثر $۰/۰۵$ می باشد.



شکل ۱-۲: مدل دودرجه آزادی بایک TMD متصل شده به سازه اصلی [۸]

در سمت چپ: نیروی دینامیکی تحریک وارده به جرم اصلی (کاربرد در ارتعاش کف)

در سمت راست: تحریک توسط شتاب زمین (کاربرد در زلزله)

بدین ترتیب که با اتخاذ نسبت جرمی ۱٪ برای TMD معادل این است که میرایی موجود کف ۵٪ افزایش یابد. این مطلب می تواند سبب کاهش قابل توجه در ارتعاش رزونانس یک کف با میرایی کم نظیر پل عابریپاده شود. اما برای یک کف با پارتیشن های زیاد یا وجود افراد زیاد روی آن (میرایی زیاد) استفاده از TMD کاهش کمی در ارتعاش خواهد داشت. اگر فقط یک مود ارتعاش مهم وجود داشته باشد استفاده از TMD موثرترین روش است. (باخمن و وبر، ۱۹۹۵؛ وبستروویکات، ۱۹۹۲)

اگر دو یا چند مود ارتعاشی با فرکانس های طبیعی نزدیک به هم وجود داشته باشد، استفاده

از TMD خیلی کمتر موثرند (مورای، ۱۹۹۶). [۳]

در مدت فعالیتهای هماهنگ که ارتعاشات بدون رزونانس رخ می دهد استفاده از TMD هیچگونه تاثیری ندارند. نهایتاً TMD که در ابتدا برای مودهای ارتعاش کف تنظیم شده اند در نتیجه اضافه یا حذف مصالح در نواحی موضعی و تغییرات در فرکانس های طبیعی کف، از تنظیم خارج می شوند.

برای موثر بودن در فعالیتهای آبروبیک جرم TMD می بایست بزرگتر از ارتعاش ناشی از راه رفتن باشد. این افزایش جرم TMD به این علت است که طبق رابطه ۲-۱ می بایست نسبت میرایی معادل سیستم (β_s) معمولاً بزرگتر باشد تا باعث کاهش ارتعاشات آبروبیک به سطوح قابل پذیرش در مکانهای حساس شود. وجود افراد روی کف به نوبه خود میرایی قابل توجهی را فراهم می کنند. زمانیکه جرم موثر کف در مقایسه با تعداد افراد موجود نسبتاً بزرگ است و شتاب در ارتعاشات رزونانس تقریباً از ۱۰٪ شتاب جاذبه کمتر می باشد آنگاه ثابت شده است که استفاده از TMD موفقیت آمیز بوده است (تورنتون و همکارانش، ۱۹۹۰). شاپ و مورای (۱۹۹۵) استفاده از TMD برای بهبود مشخصات ارتعاش کف اداری با مشخصات : در عرض تیرچه هایی بطول ۱۶ متر و در طول، چهار دهانه از تیرهای اصلی هریک بطول ۵ متر را بررسی کردند. بعلاوه وجود نارضایتی ها در ارتعاش نامطلوب کف در طبقه دوم، در ۳ کفه TMD ها نصب شدند. سیستم کف، دال بتنی با عرشه فلزی با تیرچه ها و تیرهای اصلی با جان باز بودند. برای کاهش بزرگی حرکت کف چهار دهه TMD نصب شدند. هر TMD شامل یک صفحه فولادی به عنوان فنر و دو توده صفحات فولادی به عنوان جرم و میرایی با چند سلول مایع پر شده در دو ظرف صلب فراهم شده بود.

TMD ها عمود به تیرچه ها برای کنترل مود اول ارتعاش نصب شدند (با فرکانس اساسی ۵/۱ هرتز) و با جهت موازی تیرچه ها برای کنترل مود دوم ارتعاش (با فرکانس ۶/۵ هرتز) قرار گرفتند. نظرسنجی ساکنین در بهبود وضعیت ارتعاش رضایت بخش بود. [۳]

نصب TMD برای دومود اول ودوم در پل فرچهیم آلمان توسط شرکت ماررسون که درجهت قائم نصب شده است مثال دیگری ازاین نوع می باشد. این TMD ها دارای نسبت میرایی ۸ تا ۲۰٪ می باشند اطلاعات TMD عبارت است از:

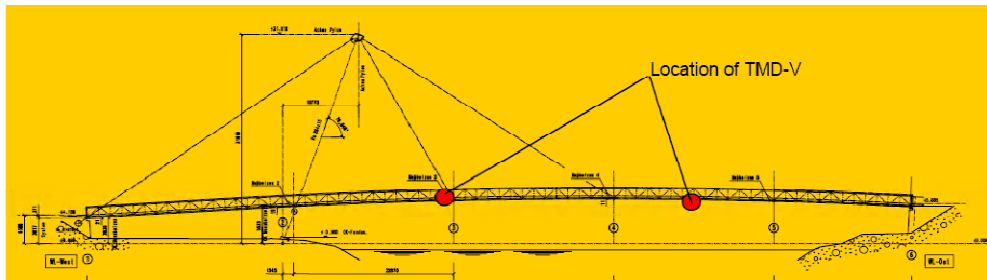
در مود اول با فرکانس ۱/۲۵۵ هرتز و جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم و میرایی ۳۳۴ کیلوگرم نیرو. ثانیه بر متر

در مود دوم با فرکانس ۲/۷ هرتز و جرم ۱۶۶۰ کیلوگرم و میرایی ۴۶۷ کیلوگرم نیرو. ثانیه بر متر

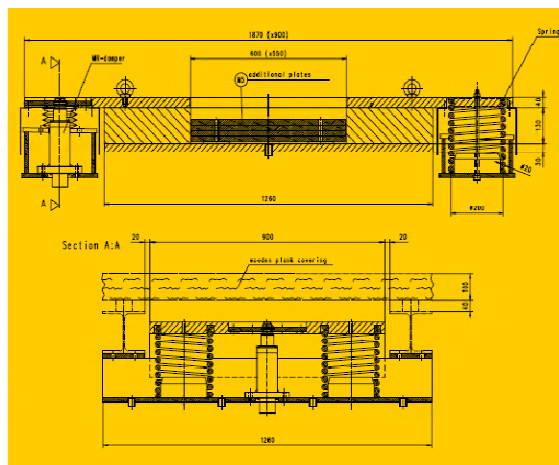
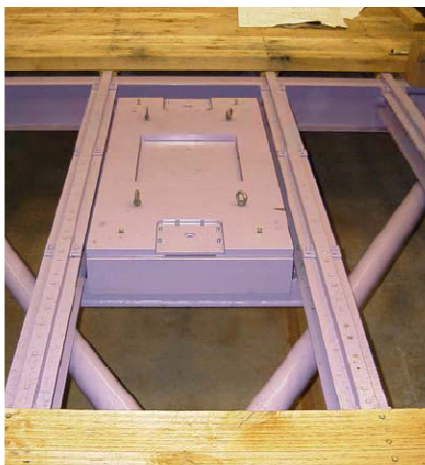
(شکلهای ۲-۱۲ تا ۲-۱۴). [۱۰]



شکل ۲-۱۲: پل فرچهیم آلمان که با TMD درمودهای قائم نصب گردیده است. [۱۰]



شکل ۲-۱۳: نمای طولی پل فرچه‌ای آلمان



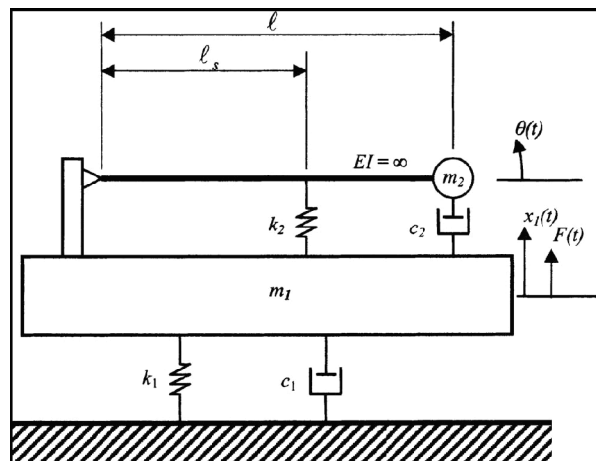
شکل ۲-۱۴: مقطع عرضی پل فرچه‌ای آلمان از محل TMD نصب شده درمورد قائم [۱۰]

۲-۱-۳-۲ میراگر تنظیم شده جرمی پاندولی

میراگر تنظیم شده جرمی پاندولی (PTMD)^۱ ابتکاری جدید از TMD طراحی شده توسط مهندسین ESI می باشد (شکل ۲-۱۵). برای کاهش ابعاد جرم مورد نیاز TMD ، جرم مورد نیاز توسط نصب صفحات فولادی در طول بازو انجام می گردد لذا می توان آنرا در داخل سقف کاذب نصب نمود.

^۱ Pendulum Tuned Mass Dampers

فنرها در طول بازو قابل حرکت می باشند با این قابلیت فرکانس طبیعی PTMD می تواند به خوبی تنظیم شود و میراگرها به جهت اعمال حداکثر نیروی میرایی در انتهای بازو نصب می گردند.



شکل ۲-۱۵: جزئیات میراگر تنظیم شده جرمی پاندولی (PTMD) [۷]

این میراگرها با یک مجموعه از پارامترهای دینامیکی تنظیم می شوند و اگر این پارامترها با زمان تغییر کنند می تواند این نوع میراگر از کوک خارج شود و قادر نخواهد بود ارتعاشات کف را کاهش دهد.

به عنوان مثال تغییرات در میزان جرم کف (بار مرده + درصدی از بار زنده) باعث از کوک خارج شدن

میراگر می باشد. [۷]

۳-۱-۳-۲ میراگرویسکوالاستیک

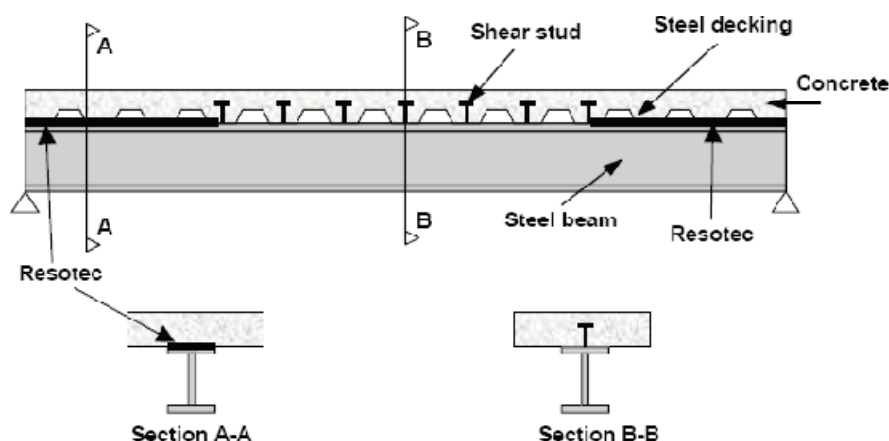
مصالح ویسکو الاستیک (VEM)^۱ روی یک پهنای باند فرکانسی وسیعتری درمقایسه با TMD در کاهش ارتعاشات کف پیشنهاد میگردند. باین حال مشابه TMD میرایی ویسکوالاستیک بطور بهینه فقط برای یک مود مشخص ارتعاش کارایی دارد. با این توصیف استفاده از مصالح ویسکوالاستیک اگر در طول دوره ساخت در کف تعبیه گردد یک روش ارزان در افزایش میرایی کف محسوب می شود (جانگرن ۲۰۰۲). یک مثال از میراگرویسکو الاستیک محصول رسوتک^۲ می باشد که توسط آروپ در همکاری با شرکت عرشه فولادی ریچارد لیسن برای تامین میرایی اضافی در ساخت کفهای کامپوزیت مدرن توسعه داده شده است. سیستم رسوتک عملکرد دینامیکی کف های کامپوزیت را با استهلاک انرژی از میان لایه های برشی میراگرویسکوالاستیک بهبود می دهد.

محصول نشان داده شده در شکل ۲-۱۶ شامل یک لایه نازک از مصالح ویسکوالاستیک با میرایی بالا است که در میان صفحات فولادی عرشه و تیر بصورت فشرده تعبیه شده است. ضخامت لایه حدود ۳ میلیمتری باشد که بعلاوه رفتار کامپوزیت کف در دو طرف ابتدا و انتهای تیر می بایست گذاشته شود. برشگیرهای فولادی در محاذات وسط تیر (محل حداکثر تلاشهای برش افقی) طبق روال معمول نصب می گردند و سپس بتن ریزی سقف انجام می شود.

^۱ Viscoelastic Materials

^۲ Resotec product

تیر فولادی در محاذات ناحیه مرکزی با دال رفتار صد درصد کامپوزیت دارد. برای تامین میرایی بیشتر کف می توان مصالح ویسکوالاستیک را در سرتاسر تیر تعبیه کرد اما این باعث از بین رفتن رفتار کامپوزیت می شود که سبب کاهش مقاومت و سختی می شود.



شکل ۲-۱۶: جزئیات نصب مصالح ویسکوالاستیک (VEM) در کف کامپوزیت

جهت افزایش میرایی [۷]

با کاربرد مصالح ویسکوالاستیک رسوتک، میرایی یک کف دوبرابر شده است (ویلفورد و همکاران، ۲۰۰۴). یکی از ضعف های مصالح ویسکوالاستیک نسبت به TMD این است که می بایست این مصالح را در طول ساخت، در کف تعبیه نمود. [۷]

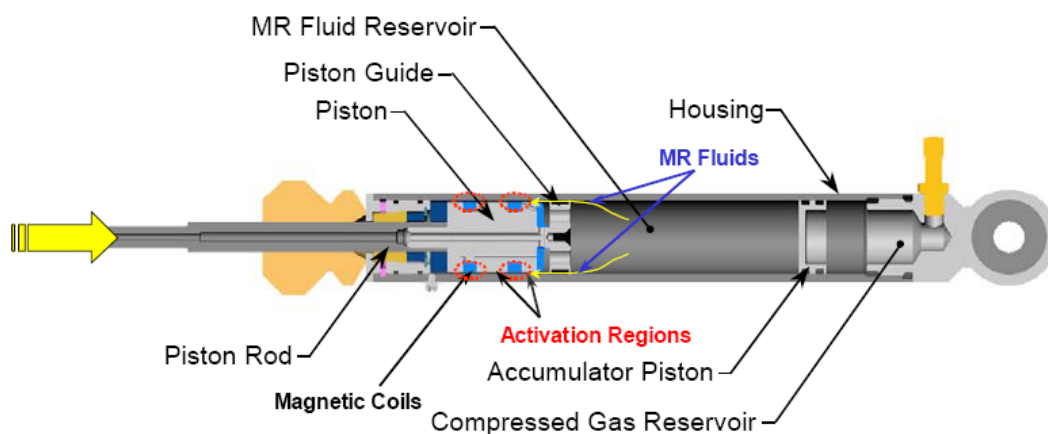
۲-۳-۲ کنترل نیمه فعال

در اثنای سال ۱۹۸۰ صنعت اتومبیل سازی انواع جاذب شوک نیمه فعال (نوع MR)^۱ را تحقیق و توسعه و آزمایش کرد. آن تحقیقات یک نوع جدید کنترل محرک که کاربردهایی در مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا دارد به بازار عرضه کرد. [۷]

یک سیستم کنترل نیمه فعال نیاز به یک منبع برق خارجی کمی برای عملکرد دارد. استفاده از برق باتری در مواقعی مانند وقوع زلزله که منبع اصلی برق از کار می افتد، امکان پذیر است.

عکس ۲-۱۷ مقطع عرضی یک نمونه MR را نشان می دهد. برخلاف میراگرهای هیدرولیک، میراگرهای MR نیاز به دريچه های مکانیکی برای کنترل جریان ندارند در عوض آنها دارای سیم پیچ های الکترومغناطیس اطراف پیستون و مخازن سیال MR دارند. ولتاژ در سیم پیچ ها میدان مغناطیسی در اطراف درز بین پیستون و محفظه ایجاد می کند. و تغییرات میدان مغناطیسی باعث تغییرات در غلظت سیال و به نوبه خود باعث تغییرات میزان میرایی می گردد. انواع میراگرهای MR عبارتند از ۱- تک لوله ۲- لوله دو بل ۳- دو طرفه ۴- اسفنجی [۱۱]

^۱ Magneto-Rheological Dampers



شکل ۲-۱۷: بزرگنمایی میراگر MR نوع نیمه فعال [۱۱]

اخیراً جامعه مهندسی عمران توجه قابل ملاحظه ای به استفاده از میراگرهای MR داشته است. چندین دلیل وجود دارد: قبل از همه اینکه میراگرهای MR میرایی متغیری دارند و دیگر اینکه توانایی آنها در تولید نیروی میرایی فوق العاده، آنها را قابل کاربرد برای کنترل سازه های بزرگ کرده است. و از طرفی غیر از حرکت پیستون قسمتهای دیگر فاقد حرکت است که آنها را ساده تر و قابل اعتماد تر ساخته است. چندین مطالعه کارآمدی میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال (STMD)^۱ را نسبت به نوع متداول غیر فعال اثبات کرده اند.

آبه و ایگوسا^۲ پس از توسعه تئوری تحلیل برای الگوریتم کنترل جاذب های نیمه فعال به این نتیجه رسیدند که STMD جهت کنترل پاسخ ضربه ای سازه اساساً از نوع TMD متداول موثرترند.

^۱ Semiactive tuned mass dampers

^۲ Abe and Igusa

پینکو وفوجنیو^۱ کارآمدی STMD را تحت تحریک هارمونیک بررسی کردند. آنها پس از بررسی پاسخ سازه یک درجه آزادی مجهزه STMD با بکارگیری تکنیک های عددی و تئوری کنترل بهینه، کاهش ارتعاش را هم در پاسخ دائمی و هم در پاسخ گذرا مافوق TMD اثبات کردند و به این نتیجه رسیدند که کاربرد STMD معادل این است که جرم TMD چهار برابر شود. [۱۱]

۳-۳-۲ کنترل فعال

منظور از کنترل فعال یک سازه استفاده از انرژی کنترلی منبع خارجی برای تخفیف حرکت ارتعاشی می باشد. اگرچه سالهاست که از کنترل فعال برای تخفیف حرکت ناشی از تحریک جانبی باد و زلزله در سازه های چند طبقه استفاده شده لیکن تاکنون استفاده دائم برای کف ها گزارش نشده است. [۳]

کنترل فعال از چهار قسمت ؛ یک محرک جرمی الکترومغناطیس^۲، یک آمپلی فایر، یک سنسور سرعت و یک کنترلر بازخورد^۳ الکترونیکی تشکیل می شود. کنترلر بازخورد الکترونیکی با توجه به ورودی سیگنال سرعت با فرستادن یک سیگنال کنترل به محرک الکترومغناطیس دستور می دهد و این سیگنال کنترل نیرویی محرک و مخالف حرکت کف ایجاد می کند که در واقع در اثر نیروی کنترلی به میرایی کف افزوده شده و رزونانس کف صورت نمی گیرد.

هاناگان و مورای (۱۹۹۴، ۱۹۹۵) گزارش تجربه های آزمایشگاهی رابه شرح زیر ارائه دادند.

^۱ Pinkaew and fujino

^۲ Actuator

^۳ Feedback

با استفاده از یک رایانه و محرک جرمی الکترومغناطیس با بکاربردن نیروهای کنترلی روی سیستم کف و افزایش میرایی سیستم کف ، سیستم کنترل فعال پاسخ کف را بهبود داد و سرعت ماکزیمم حدوداً با ضریب ۱۰ کاهش داده شد.

هانگان و مورای (۱۹۹۵) با بکارگیری میراگر فعال روی سه کف با کاربرهای اداری و آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که وقتی که فرکانس اساسی سیستم کف زیر ۵ تا ۶ هرترزی باشد استفاده از میراگرهای فعال خیلی موثر نیستند. [۳]

سیستم های کنترل فعال کف ها در حال توسعه هستند. اگرچه چشم انداز استفاده از آن بطور موفقیت آمیزی ثابت شده لیکن به دودلیل تاکنون هیچگونه نصب دائمی گزارش نشده است : نخست بدلیل هزینه نسبتاً بالای اولیه آن می باشد و دلیل دیگر این است که کنترل فعال نیاز به جریان الکتریکی مستمرونه گذاری دوره ای دارد.

هانگان (۱۹۹۶) گزارش داده است که هزینه سیستم کنترلی اش برای کف ساختمان اداری نمونه ۱۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ دلار می باشد.

پیش بینی می شود در آینده هزینه های وابسته به وسایل کنترل ارتعاش به سرعت کاهش یابد ولی بحث نگهداری احتمالاً بقوت خود باقی خواهد ماند. [۳]

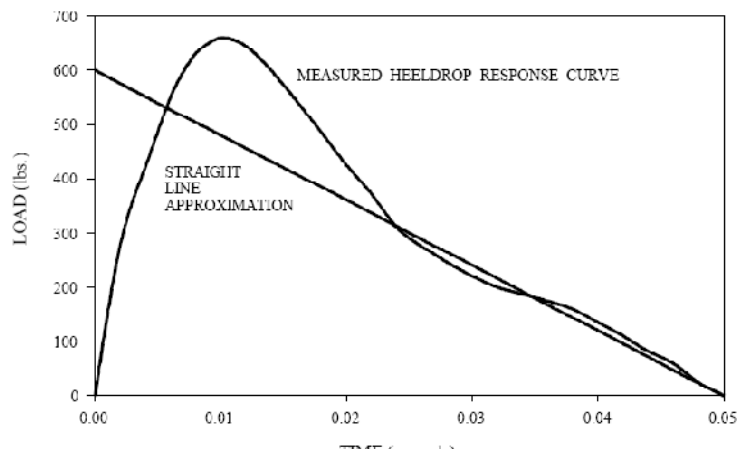
فصل ۳ ضوابط طراحی کف های مرتعش

۱-۳ مقدمه

یکی از کاملترین ضوابط طراحی ارتعاش، راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا است که در ابتدا به بیان خلاصه ای از ضوابط ارتعاش برای کاربریهای مسکونی، اداری، تجاری، پلهای عابر پیاده پرداخته می شود. بارگذاری مورد استفاده در این کاربریها فعالیت انسانی ناشی از راه رفتن می باشد و شتاب اوج این کف ها براساس باردینامیکی راه رفتن بدست می آید و با حد شتاب مطلوب مقایسه می گردد. در ادامه به بیان نحوه محاسبه شتاب اوج برای فعالیتهای انسانی هماهنگ از قبیل ورزشهای آیروبیک پرداخته می شود و در ادامه نحوه مدلسازی با نرم افزار اجزای محدود SAP2000 بیان خواهد شد سپس نحوه تعیین بارهای دینامیکی معادل راهنمای طراحی که در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی کاربرد دارد، توضیح داده خواهد شد.

۲-۳ ضوابط طراحی ارتعاش مطابق راهنمای طراحی

برای مدل کردن ضربه ناشی از راه رفتن یک شخص، مفهوم (کمیت) ضربه استاندارد تعریف شده است. این کمیت براساس اعمال ضربه پای شخصی به وزن ۱۷۰ پاوند (۷۷ کیلوگرم نیرو) تعیین می شود: شخص روی پنجه های پایش ایستاده و پس از بلند کردن پاشنه پا در حدود ۲/۵ اینچ بطور ناگهانی وزنش را از طریق پاشنه پا به کف منتقل می سازد. ترسیمی از فرایند ضربه پا (شکل ۱-۳) و پاسخ کف نمونه به چنین ضربه ای (شکل ۲-۳) می باشد. چندین محقق روشهایی برای ارزیابی و طراحی ارتعاشات کف بعلت ضربات پاشنه پا پیشنهاد کرده اند. در بین آنها معیار مورای از جامعیت بیشتری در بین طراحان سازه در ایالات متحده برخوردار است. [۵، ۶]



شکل ۱-۳: میانگین ترسیم نیرو - زمان برای ضربه پای استاندارد [۶]

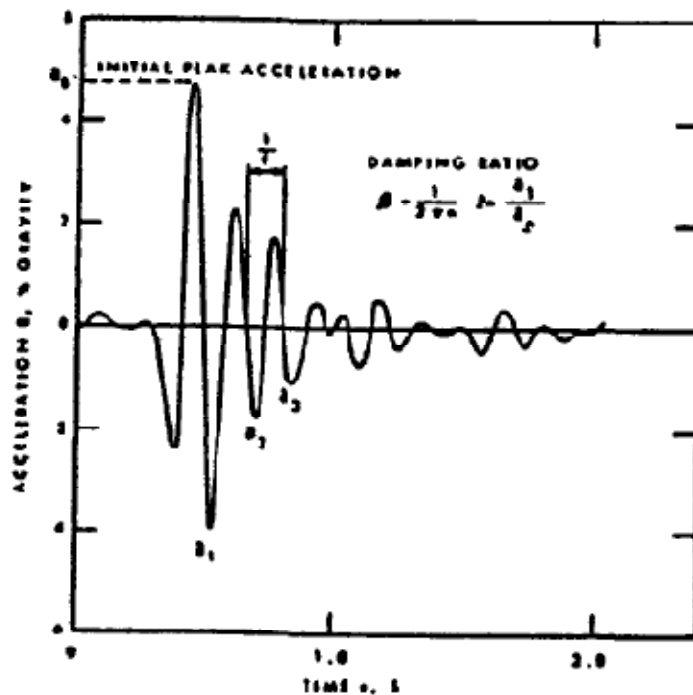
۱-۲-۳ ارتعاش کف برای فعالیت مرتبط با راه رفتن

معیار راهنمای طراحی می تواند برای بررسی سیستم های سازه ای کف های کامپوزیت بتنی و فولادی

از قبیل پل های عابر پیاده، کاربریهای اداری، مسکونی، تجاری بکار رود. این بخش به معیار راه رفتن^۱

و پروسه های مهم برای محاسبات خواص سیستم کف اختصاص دارد. [۳]

^۱ Walking Activity



شکل ۳-۲: پاسخ کف نمونه به ضربه پاشنه پا (با حذف فرکانس های بالاتر)[۶]

قابلیت پذیرش: معیار طراحی بیان می کند که یک سیستم کف وقتی رضایت بخش است که شتاب اوج کف (a_p) ناشی از تحریک راه رفتن انسان به صورت نسبتی از شتاب جاذبه (g) از رابطه زیر بیشتر نگردد. مقادیر کرانه (حد شتاب نسبی) با توجه به نوع کاربری از جدول ۳-۱ تعیین می شود.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35 f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (۱-۳)$$

در رابطه فوق p_0 بیانگر نیروی ثابت عامل تحریک ، f_n فرکانس طبیعی یک تیر یا تیرچه فرعی یا تیر اصلی یا ترکیبی از تیرهای فرعی و اصلی، هر کدام که موثر باشد. β نسبت میرایی مودال است.

و وزن موثر تحمل شده توسط تیریا تیرچه فرعی، پانل تیراصلی یا ترکیبی از این دو، هر کدام که موثر باشد. در ادامه مطالب در خصوص کاربرد پارامترهای فوق توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

به عنوان نمونه برای کاربری اداری با توجه به جدول ۳-۱ شتاب مجاز کف ۵/۰ درصد شتاب جاذبه می باشد. مقدار توصیه شده p_0 ، ۶۵ پوند (تقریباً ۳۰ کیلوگرم نیرو) برای این نوع کاربری است.

در این نوع کاربری بار مرده اضافی ۴ پوند برفوت مربع (تقریباً ۲۰ کیلوگرم نیرو بر متر مربع) برای سقف و بارهای مکانیکی در محاسبات ارتعاشات کف فرض می شود. میرایی و بارهای زنده برای انواع مختلف کاربری اداری تغییر می کنند. در سیستم های کف سبک امروزی مثل ادارات الکترونیکی که تجهیزات آن فقط شامل میز و رایانه هاست مقادیر فرضی میرایی بین ۲ تا ۵/۲٪ و بارهای زنده فرضی ۸ پوند برفوت مربع (تقریباً ۴۰ کیلوگرم نیرو بر متر مربع می باشد) (شکلهای ۳-۳ و ۳-۴).

در دفتر روزنامه نگاری که تجهیزات شامل فایل های سنگین، میزها، اثاثیه، کامپیوتر و تجهیزات فنی است مقادیر فرضی برای میرایی و بار زنده به ترتیب ۳٪ و ۱۱ پوند برفوت مربع (تقریباً ۵۵ کیلوگرم نیرو بر متر مربع) در نظر گرفته می شود (شکل ۳-۵).

جدول ۱-۳ مقادیر توصیه شده پارامترها در رابطه ۲-۱ و حدود شتابهای کف بعثت راه رفتن [۳]

نوع کاربری	نیروی ثابت (P_0)	نسبت میرایی (β)	حد مطلوب شتاب نسبی a_0/g
اداری، مسکونی، کلیسا	0.29KN(65lb)	0.02-0.05	0.5%
فروشگاههای خرید	0.29KN(65lb)	0.02	1.5%
پل های عابر پیاده-خلوت	0.41KN(92lb)	0.01	1.5%
پل های عابر پیاده -شلوغ	0.41KN(92lb)	0.01	5%

Damping β

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

$$\beta = 0.02$$



شکل ۳-۳: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت عدم

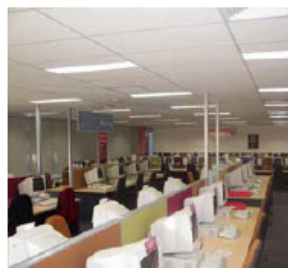
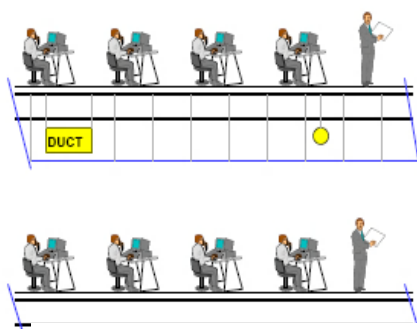
وجود حداقل اجزای غیرسازه ای از قبیل سقف کاذب

، داکتها و پار تیشننها [۱۲]

Damping β

$$\beta = 0.025$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

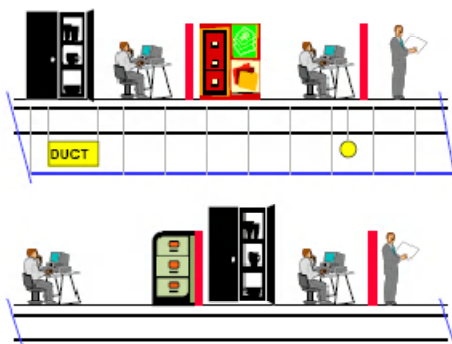


شکل ۳-۴: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت وجود حداقل اجزای غیرسازه ای از قبیل سقف کاذب، داکت و پارتیشن‌ها [۱۲]

Damping β

$$\beta = 0.03$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

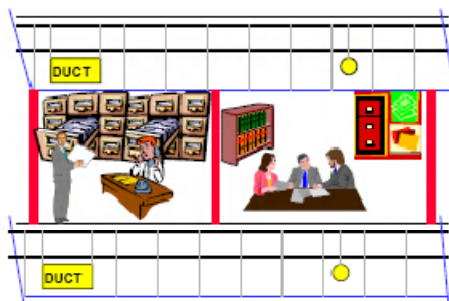


شکل ۳-۵: مقدار میرایی مودال (β) برای کاربری اداری در حالت وجود اجزای غیرسازه ای مثل سقف کاذب، پارتیشن‌های قابل برداشتن، همراه با قفسه های کتاب و کمد های پر [۱۲]

Damping β

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

$$\beta = 0.05$$



شکل ۳-۶: مقدار میرایی مودال (β) کاربری اداری [۱۲]:

با وجود اجزای غیرسازه ای مثل سقف کاذب، داکت‌ها و به حد کافی پراز پارتیشن‌های به ارتفاع طبقه یادرحالت وجود فایلها وقفسه های کتاب(ساختمانهای اداری قدیم)

درشروع ارزیابی یک کف برای کنترل ارتعاش لازم است فرکانس اساسی تیرهای یا تیرچه های فرعی وتیرهای اصلی تعیین شوند. فرکانس اساسی (f) برای هر عضو قاب از رابطه زیر تخمین زده می شوند.

$$f_j = f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_{ss}}} \quad (۲-۳)$$

در رابطه فوق اندیس j مربوط به تیرفرعی یا تیرچه و g مربوط به تیر اصلی است.

گشتاب جاذبه ($9.81 m/s^2$) و Δ_{ss} خیز تیرفرعی (تیرچه) یا تیر اصلی بعلمت بار واحد طول ω می باشد.

فرض براین است که اعضای قاب درسیستم کف دارای اتصال ساده در تکیه گاه ها باشند. بنابراین

ماکزیمم خیز (Δ_{ss}) در وسط دهانه عضو با تکیه ساده تخمین زده می شوند با

$$\Delta_{ss} = \Delta_j = \Delta_g = \frac{5\omega L^4}{384E_s I_t} \quad (3-3)$$

در رابطه فوق ω بار واحد طول (شامل بار مرده و تخمینی از بار زنده واقعی بر حسب کیلوگرم نیرو بر واحد طول می باشد).

E_s مدول الاستیسیته فولاد (kgf/cm^2) و L طول عضو (cm) و I ممان اینرسی کامپوزیت (cm^4).
در هنگام محاسبه I_t ؛ راهنمای طراحی توصیه می کند که عرض موثر دال بتنی از فواصل اعضا از یکدیگر بیشتر نشود. و همچنین محدود به $4/10$ دهانه عضو باشد. در هنگام تعیین I_t ، مدول الاستیسیته بتن برای بحساب آوردن سختی بیشتر دال در طول بارگذاری دینامیکی ۳۵٪ افزایش می یابد. اگر تیر مقطع نورد شده گرم باشد ممان اینرسی کامپوزیت بطور کامل استفاده می شود. از آنجا که تیرچه ها برخلاف مقاطع گرم نورد شده تغییر شکل های برشی قابل توجهی از خود نشان می دهند لذا ممان اینرسی کامپوزیت کامل کاهش می یابد. لذا ممان اینرسی کامپوزیت موثر تیرچه ها توسط رابطه زیر تخمین زده می شود.

$$I_{eff} = \frac{1}{\frac{\gamma}{I_{chords}} + \frac{1}{I_{comp}}} \quad (4-3)$$

در رابطه فوق I_{chords} ممان اینرسی یالهای تیرچه (cm^4) ؛ I_{comp} ممان اینرسی تبدیل یافته کامپوزیت یالهای تیرچه و دال بتنی است (cm^4). ضریب کاهش (γ) توسط باند و مورای (۱۹۹۶) از رابطه زیر بدست می آید:

$$\gamma = \frac{1}{C_r} - 1 \quad (5-3)$$

در صورتیکه $6 \leq L/D \leq 24$ برای تیرچه^۱ ها یا تیرچه های اصلی^۲ با اعضای جان ازبشی با نسبت طول به عمق با ضابطه :

$$C_r = 0.90(1 - e^{-0.28(L/D)})^{2.8} \quad (6-3)$$

و برای تیرچه ها با اعضای جان مدور و نسبت طول به دهانه $10 \leq L/D \leq 24$ داریم:

$$C_r = 0.721 + 0.00725(L/D) \quad (7-3)$$

در رابطه فوق ، L طول دهانه و D عمق اسمی تیرچه می باشد. در حالتیکه تیرهای اصلی (پل

ها) در تماس مستقیم با دال باشد و از مقاطع گرم نورد شده در تیرهای فرعی استفاده شود. هنگام

محاسبه خواص مقطع تیرهای اصلی ، ممان اینرسی تبدیل یافته کامل (I_{comp}) در محاسبه خیز (رابطه

۳-۳) استفاده می شود.

در حالتیکه تیرهای تیرچه های اصلی نورد شده ، تیرچه های فرعی با جان باز را تحمل می کنند . برای

بحساب آوردن فقدان سختی فراهم شده با اتصالات نشیمن تیرچه ممان اینرسی موثر (I_{eff}) تیر اصلی

برابر است با این رابطه:

¹ joist

² Joist-girders

$$I_{eff} = I_g + (I_{comp} - I_g) / 4 \quad (۸-۳)$$

در رابطه فوق I_g ممان اینرسی غیر کامپوزیت تیر اصلی (ممان اینرسی خود تیر اصلی) و I_{comp} ممان اینرسی کاملاً کامپوزیت تیر اصلی در ترکیب با بتن می باشد.

فرکانس ترکیبی سیستم کف را می توان از رابطه دانکرلی داده شده بار رابطه زیر بدست آورد.

$$\frac{1}{f_n^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \quad (۹-۳)$$

در رابطه فوق f_n فرکانس سیستم کف بر حسب هرتز ؛ f_j فرکانس تیر یا تیرچه فرعی؛

f_g فرکانس تیر اصلی می باشد. همچنین فرکانس سیستم را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \quad (۱۰-۳)$$

رابطه فوق فرم دیگری از رابطه ۹-۳ می باشد.

وزن موثر تیر فرعی تخمین زده می شود از:

$$W_j = w_j B_j L_j \quad (۱۱-۳)$$

و بطور مشابه وزن موثر تیر اصلی تخمین زده می شود از:

$$W_g = w_g B_g L_g \quad (۱۲-۳)$$

در روابط فوق $w_{j,g}$ بار واحد سطح (kgf / m^2)؛ B پهنای موثر (m)؛ L طول دهانه عضو (m).

منظور از وزن موثر، سطوح بارگیر تیر اصلی یا تیر فرعی در مسائل ارتعاش می باشد.

برای تیریا تیرچه فرعی، پهنای موثر بدست می آید از:

$$B_j = C_j (D_s / D_j)^{1/4} L_j \quad (13-3)$$

در رابطه فوق $C_j = 2$ برای تیرچه ها و تیرهای فرعی در بیشتر سطوح است.

$C_j = 1$ ؛ وقتی که تیرهای تیرچه های فرعی موازی لبه کناری است.

D_j ممان اینرسی تبدیل یافته واحد پهنای تیریا تیرچه فرعی (cm^4 / m).

D_s ممان اینرسی تبدیل یافته واحد پهنای دال (cm^4)؛ L_j طول دهانه عضو (m).

پهنای موثر تیریا تیرچه نمی تواند بزرگتر از دوسوم پهنای کف در جهت عمود به تیریا دهانه تیرچه باشد.

در حالت تیر اصلی، پهنای موثر محاسبه می شود با:

$$B_g = C_g (D_j / D_g)^{1/4} L_g \quad (14-3)$$

در رابطه فوق $C_g = 1/6$ برای تیرهای اصلی که تیرچه های متصل شده به بال تیرهای اصلی را از طریق

نشیمن تیرچه تحمل می کنند. $C_g = 1/8$ برای تیرهای اصلی که وزن تیرهای فرعی متصل در قسمت

جان تیر اصلی را تحمل می کنند. D_j ممان اینرسی تبدیل یافته برواحد عرض تیر فرعی یا تیرچه (

cm^4 / m)؛ D_g ممان اینرسی تبدیل یافته تیر اصلی برواحد عرض (cm^4 / m)؛ L_g طول دهانه

تیر اصلی (m).

پهنای موثر در حالت تیر اصلی نمی تواند بزرگتر از دوسوم طول کف در جهت عمود به دهانه تیر اصلی

باشد. در صورتیکه تیریا تیرچه های فرعی یا تیرهای اصلی در تکیه گاهها ممتد باشند و دهانه

مجاور بزرگتر از ۷/۰ دهانه مورد بررسی باشد آنگاه وزن موثر (W_j یا W_g) ممکن است تا ۵۰٪ افزایش یابد.

این افزایش وزن، در صورتی انجام می گردد که تیرهای فرعی با مقاطع گرم نورد شده با اتصالات برشی

به جان تیرهای اصلی متصل شده باشند (مثل اتصال با نبشی جان) یا در صورت استفاده از تیرچه های فرعی این تیرچه ها توسط یالهایشان در بالا و پایین به تیر اصلی متصل شده باشند.

وزن موثر معادل سیستم کف (W) از ترکیب وزن موثر تیرهای فرعی و اصلی طبق رابطه زیر بدست می آید:

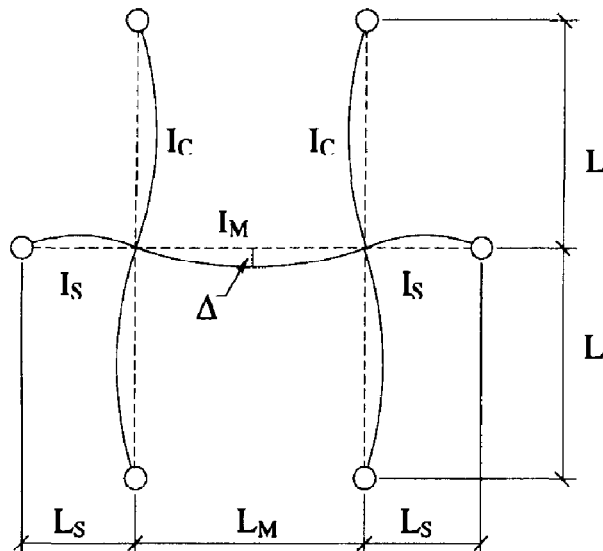
$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g \quad (15-3)$$

Δ_j, Δ_g, W_j یا W_g قبلا شرح داده شده است. خیز تیر اصلی (Δ_g) می تواند کاهش یابد اگر دهانه تیر اصلی (L_g) کمتر از عرض تیرچه (B_j) باشد. توجهی مطلب این است که سیستم کف سخت می شود و مود ترکیبی در فشار قرار می گیرد. خیز کاهش یافته تیر اصلی (Δ'_g) تقریباً می شود:

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} (\Delta_g) \quad (16-3)$$

در صورتیکه $0.5 \leq L_g / B \leq 1$ با کاهش خیز تیر اصلی فرکانس طبیعی پیش بینی شده افزایش می یابد. به منظور محاسبه فرکانس تیرهای اصلی یا فرکانس سیستم کف، خیز Δ_g در روابط ۱۵-۳ با Δ'_g جایگزین می شود.

راهنمای طراحی در دهانه های یکسره که با اتصال صلب به ستونها متصل می باشند کاهش در خیز تیرهای کامپوزیت اجازه می دهد. در نتیجه در این نوع کف ها خیز کاهش یافته از رابطه زیر بدست می آید.



شکل ۷-۳: خیزهای خمشی مودال برای تیروتیراصلیها با اتصال صلب به ستونها [۳]

$$\Delta = \left[\frac{0.6 + 2 \frac{k_m}{k_s} (1 + 1.2\lambda) + 0.6n_c \frac{k_c}{k_s}}{3 + 2 \frac{k_m}{k_s} + 3n_c \frac{k_c}{k_s}} \right] \Delta_{ss} \quad (۱۷-۳)$$

در رابطه فوق $\lambda = (L_s / L_M)^2$ ، $k_m = I_M / L_M$ ، $k_s = I_s / L_s$ ، $k_c = I_c / L_c$ و I ممان اینرسی (cm^4) و

L_s, L_M, L_c در شکل ۷-۳ تعریف می شوند. $n_c = 2$ ؛ اگر در بالا و پایین کف، ستون وجود داشته باشد.

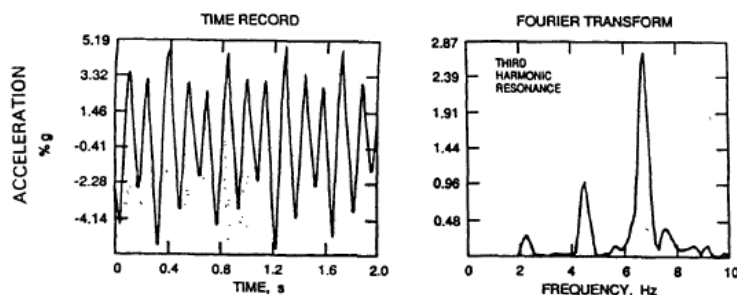
$n_c = 1$ ؛ اگر فقط بالا یا پایین کف، ستون وجود داشته باشد.

روش دیگر محاسبه فرکانس های طبیعی تیرهای فرعی یا اصلی با استفاده از رابطه ۲-۳ می باشد

در این حالت خیز Δ_{ss} با $\Delta_{j,g}$ جایگزین می شود.

۲-۲-۳ ارتعاش کف بعلت فعالیتهای هماهنگ

فعالتهای هموزن و هماهنگ^۱ از قبیل پایکوبی ، مشارکت شنودگان در سالن های کنسرت و از همه مهمتر فعالیتهای آیروبیک می توانند سطوح ارتعاش نامطلوبی رافراهم کنند. در نتیجه فعالیتهای هموزن ، پدیده رزونانس یا رفتار نزدیک به آن رخ خواهد داد که شرایط دینامیکی کف را مضاعف خواهد کرد و موجب سلب آسایش افراد می شود. مهمترین نکته در طراحی ایده آل ، دور کردن فرکانس طبیعی سیستم کف از فرکانسهای غالب ناشی از فعالیتهای منظم انسان می باشد که بطور قطع اطمینان می دهد که تشدید یا رزونانس رخ نخواهد داد. به عنوان نمونه بیشترین مشکلات موجود در ارتعاش کف ها استفاده همزمان از یک کف برای سالن آیروبیک و کاربری اداری روی همان کف است که لازم است در این کف ها توجه ویژه ای در خصوص بررسی و کنترل ارتعاش بعمل آید. [۶]



شکل ۳-۸: ارتعاش در یک کف با فرکانس ۶/۷ هرتز بعلت فعالیتهای آیروبیک با فرکانس ۲/۲۵ هرتز [۶]

^۱ Rhythmic Activity

از آنجا که در بیشتر فعالیتهای هماهنگ، در نظر گرفتن هارمونیک اول (فرکانس اصلی محرک) کفایت می کند برای فعالیتهای آیروبیک و دیگر تمرینات پرشی هماهنگ، دومین و سومین هارمونیک می تواند سهم بسزایی داشته باشد که می بایست در تحلیل دینامیکی کف ها مد نظر قرار گیرد. شکل ۳-۸ تشدید در فعالیت هارمونیک با فرکانس هارمونیک اول به میزان ۲/۲۵ هرتز در مقابل فرکانس ۶/۷ هرتز سیستم کف را نشان می دهد.

طبق نظر آلن، رزونانس مهمترین عامل تاثیر گذار در ارتعاش آیروبیک می باشد، از اینرو فرکانس اساسی طبیعی مهمترین پارامتر طراحی سازه ای است و ایجاد فرکانس طبیعی دورتر از هارمونیک سوم از وقوع رزونانس جلوگیری خواهد کرد. [۶]

گامهای طراحی برای جلوگیری از ارتعاش کف بعلا فعالیتهای هماهنگ به شرح زیر می باشد:

(۱) برای هر نوع فعالیت، محدوده فرکانس نیروی محرک (f) از جدول ۳-۲ تعیین شود.

برای فعالیتهای آیروبیک و پرشی سه هارمونیک اول می بایست در نظر گرفته شود.

(۲) حداکثر مقدار قابل پذیرش شتاب کف (a_0) را از جدول ۳-۳ تعیین شود.

می توان محدوده شتاب مطلوب کف برای انواع کاربری را از نمودارهای ISO شکل ۲-۸ بدست آورد.

(۳) ضریب بار دینامیکی (α) و وزن افراد (w_p) بصورت گسترده روی کف از جدول ۳-۲ بدست می آید.

(۴) بار کل کف (w_t) از جمع بار مرده معمول کف به w_p بدست می آید.

(۵) فرکانس طبیعی سیستم کف (f_n) با استفاده از روابط ۳-۳ و ۳-۱۰ با توجه به بار w_t محاسبه شود.

(۶) بایستی رابطه زیر را برای حداقل فرکانس طبیعی سیستم کف کنترل شود. (باید $f_n = f_s$)

$$f_s \geq f_i \sqrt{1 + \frac{K}{a_0/g} \times \frac{\alpha_i w_p}{w_i}} \quad (3-18)$$

در رابطه فوق نسبت (a_0 / g) حد شتاب مورد بحث در جدول ۳-۳ می باشد.

ضریب k مساوی ۱/۳ برای فعالیت انسانی پاییکوبی انتخاب می گردد.

ضریب k مساوی ۱/۷ برای کنسرت‌های زنده ورقابت های ورزشی انتخاب می گردد.

ضریب k مساوی ۲ برای تمرینات پرشی و آیروبیک ؛ سه هارمونیک اول فرکانس نیروی محرک می

بایست در نظر گرفته شود. و برای هر سه هارمونیک می بایست معیار برآورده شود. [۳]

(۷) آلن توصیه می کند که سیستم های کف با احتساب ساکنین که حداقل فرکانسهای طبیعی جدول

(۳-۴) را ارضا نمی کنند، می بایست ارزیابی جامعتری از آنها بعمل آید.

جدول ۳-۲: پارامترهای پیشنهادی طراحی برای فعالیتهای هماهنگ [۶]

نوع فعالیت	نوع هارمونیک	فرکانس نیرو (HZ)	وزن ساکنین $w_p (kpa)$	ضریب باردینامیکی (α) ^۱
پایکوبی	اول	۱/۵-۳/۰	۰/۶ (هرزوج ۲/۵ مترمربع)	۰/۵
کنسرت زنده یا رقابت	اول	۱/۵-۳/۰	۱/۵ (هر فرد ۰/۵ مترمربع)	۰/۲۵
های ورزشی	دوم	۳-۵	۱/۵ (هر فرد ۰/۵ مترمربع)	۰/۰۵
آیروبیک	اول	۲-۲/۷۵	۰/۲ (هر فرد ۳/۹ مترمربع)	۱/۵
(تمرینات پرشی) ^۳	دوم	۴-۵/۵	(هر فرد ۳/۹ مترمربع)	۰/۶
	سوم	۶-۸/۲۵	۰/۲ (هر فرد ۳/۹ مترمربع)	۰/۱
راه رفتن در قالب	اول	۱/۶-۲/۲		۰/۵
حرکتی هارمونیک	دوم	۳/۲-۴/۴		۰/۲
[۳]	سوم	۴/۸-۶/۶		۰/۱
	چهارم	۶/۴-۸/۸		۰/۰۵

^۱ مقادیر α براساس رویارویی عادی حداقل ۲۰ نفر است. مقادیر ضریب دینامیکی می بایست برای رویارویی های خوب هماهنگ شده (مثل پایکوبی و پریدن) یا کمتر از ۲۰ نفر اصلاح شوند.

تراکم افراد در شرایط عمومی رویارویی بطور عادی است. برای رویدادهای ویژه تراکم می تواند بزرگتر اتخاذ شود.^۲

^۳ تجدید نظری پیشنهاد شده به پیوست ۱۹۸۵ از آیین نامه CSA

جدول ۳-۳: حدود شتاب مطلوب برای ارتعاش ناشی از فعالیتهای هماهنگ [۶]

حد شتاب (درصد شتاب جاذبه)	ساکنین در معرض ارتعاش
۰/۴-۰/۷	مسکونی، اداری
۱/۵-۲/۵	رستوران، وزنه برداری، پایکوبی
۴-۷	آیروبیک؛ فقط فعالیت هموزن
۲	کف آیروبیک در مجاورت مسکونی

جدول ۳-۴: حداقل فرکانس طبیعی کف توصیه شده با احتساب وزن ساکنین [۶]

استادیوم سکوهای ورزش ^۱	کف های محل سالن رقص ^۲ کف سالن ورزشهای عمومی ^۳	نوع سازه کف
۶	۹	ترکیب بتن وفولاد (کامپوزیت)
۵	۷	بتنی
۸	۱۲	چوبی

محدودیت شتاب اوج مساوی ۰/۰۵ شتاب جاذبه^۱

محدودیت شتاب اوج مساوی ۰/۰۲ شتاب جاذبه^۲

محدودیت شتاب اوج مساوی ۰/۰۵ شتاب جاذبه^۳

۳-۳ مدلسازی بروش اجزای محدود

۱-۳-۳ برنامه رایانه ای اجزای محدود

از آنجا که جهت نیل به اهداف این تحقیق ، مدل کردن سه بعدی کف های کامپوزیت از ضروریات می باشد لذا در وهله اول با استفاده از آخرین نسخه موجود برنامه ETABS2000 (در حال حاضر نسخه 9.2) نسبت به مدل کردن کف مذکور اقدام شد پس از بررسی و تحلیل کف های متعدد، این نتیجه عاید شد که این برنامه فقط در مرحله طراحی نسبت به کنترل کف کامپوزیت می پردازد (فقط پس پردازنده کنترل طراحی دارد) و در تحلیل مودال از مشخصات کامپوزیت تیرودال استفاده نمی کند . در نتیجه علیرغم سهولت منحصربفرد مدلسازی کف کامپوزیت با این برنامه و محدودیت فوق الذکر، در این تحقیق برنامه SAP2000 به جهت برتری های متعدد تحلیل دینامیکی، مورد استفاده قرار گرفت.

لذا از برنامه اجزای محدود SAP2000 نسخه پیشرفته 11.0.7 دربرگیرنده تحلیل استاتیکی و دینامیکی مربوط به شرکت کالیفرنایی سازه ها و کامپیوترها (ویلسون و حبیب الله محصول ۲۰۰۷) استفاده گردید. در زیر خلاصه ای از برتریهای دینامیکی این برنامه شرح داده می شود.

۱- دارای المان ارتباطی که درشش درجه آزادی می تواند سختی از صفر تا ۱۰۰٪ را ایجاد کند (سختی های نسبی).

۲- دارای گزینه معرفی میرایی مودال سازه در قالب ماتریس میرایی می باشد.

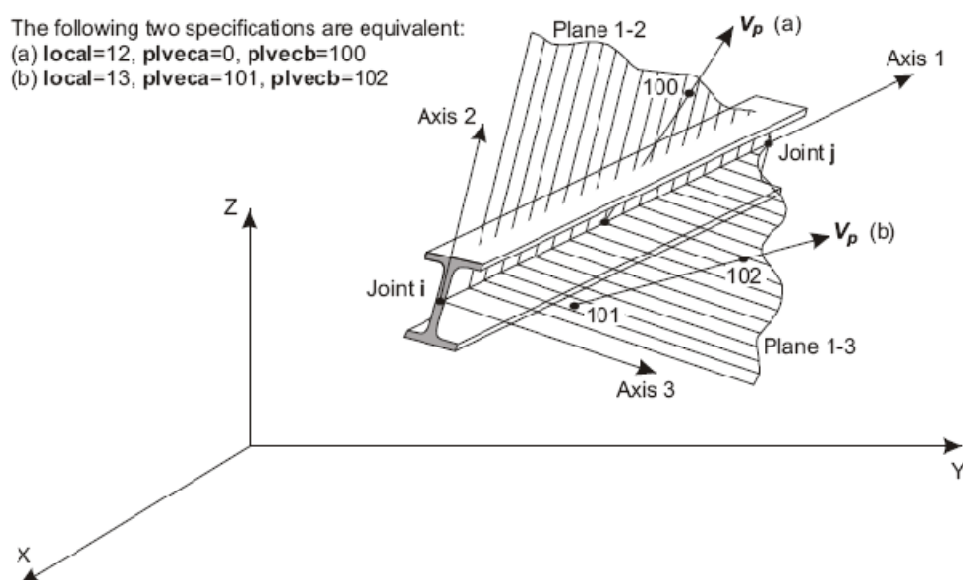
۳- می توان درصد های میرایی را برای هر مود جداگانه معرفی کرد.

۴- گزینه ای که با معرفی ضرایب ماتریس سختی و جرم، ماتریس میرایی محاسبه می گردد. [۱۳]

۲-۳-۳ نحوه استفاده از المان محدود

۱-۲-۳-۳ مدلسازی کف کامپوزیت

در این مطالعه اجزای محدود تیر، پوسته و المان ارتباطی^۱ مورد استفاده قرار گرفتند. المان تیر SAP2000 دارای دو گر که در هر گر که دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی می باشد (شکل ۹-۳).



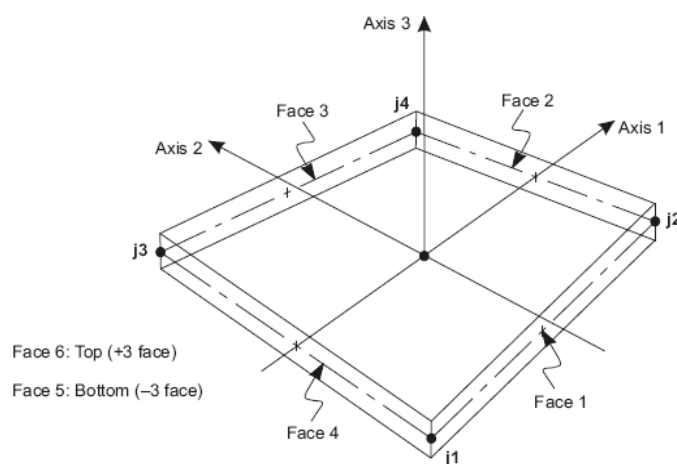
شکل ۹-۳: استفاده از گر که ها در تعریف سیستم مختصات محلی المان تیر در مدل SAP2000 [۱۳]

برای مدل کردن دال بتنی از المان پوسته نازک^۲ استفاده گردیده است. المان مذکور در SAP2000 دارای چهار گر که در محاذات لایه مرکزی می باشد که هر گر که دارای شش درجه

^۱ Link

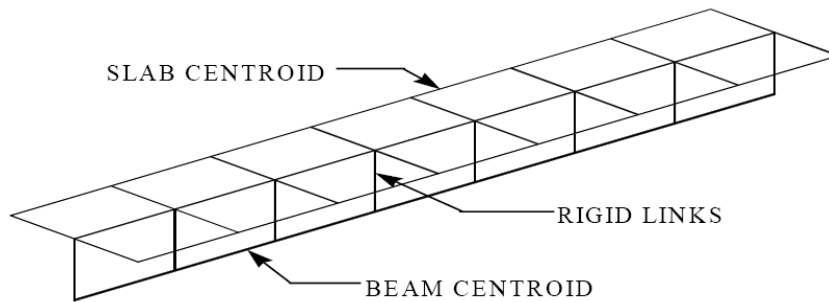
^۲ Thin Shell

آزادی می باشد. این المان دارای گزینه اعمال ضخامت دال وحتی دربرگیرنده شبکه میلگرد بصورت یک لایه ودولایه می باشد. که سعی شده است به جهت انطباق کف سازه با واقعیت ازاین خواص درمدلسازی استفاده شود وبعلت نازکی ازتغییرشکل برشی آن صرف نظرشده است(شکل ۳-۱۰).



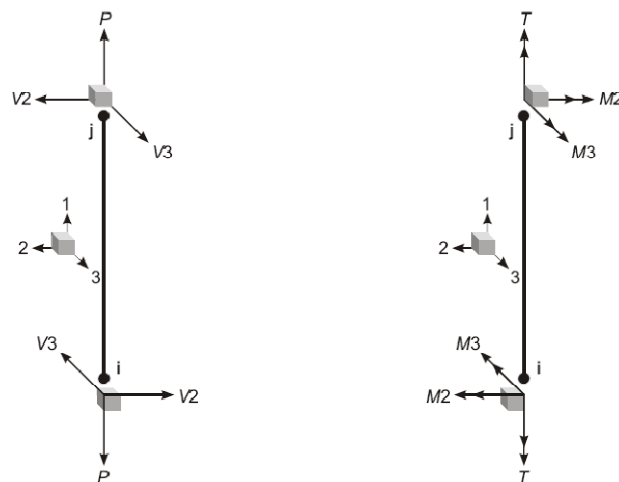
شکل ۳-۱۰: المان شل چهارگره ای چهارضلعی SAP2000 درمدلسازی دال بتنی [۱۳]

برای اینکه رفتار کامپوزیت تیرهای فرعی واصلی ودال بتنی مدلسازی شود المانهای تیروپوسته توسط المان ارتباطی خطی بهم متصل شده اند(شکل ۳-۱۱). این المان درمجموع شش درجه آزادی دارد. بعنوان مثال چنانچه درجهت قائم این درجه آزادی فیکس گردد دراین راستا المان صلب خواهد شد یعنی بدون هیچگونه تغییرشکلی نیرو را درجهت قائم منتقل می کند. به همین نحو درراستای افقی می تواند بدون تغییرشکل نیروی برشی را ازیک المان به المان دیگرمنتقل کند(شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۱: مدل کف کامپوزیت با تیرهای نورد شده و دال بتنی که با المان ارتباطی صلب متصل شده [۲]

CSI Analysis Reference Manual

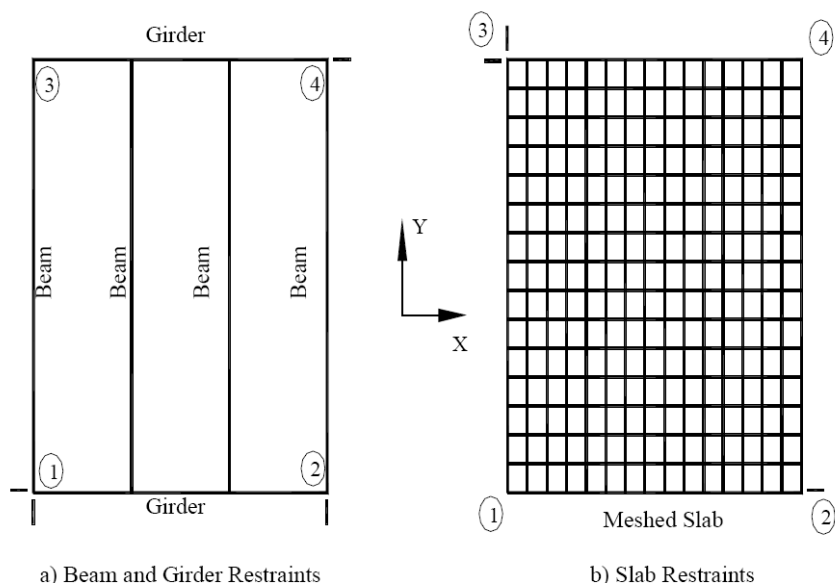


شکل ۳-۱۲: لنگر و نیروهای درونی روی گره ها در المان ارتباطی (لینک) [۱۳]

پس از ایجاد مدل هندسی و اتصال اعضای کف به یکدیگر طبق معمول روشهای مدلسازی ، لازم است تا برخی گره های خارجی کف دارای درجه آزادی مقید و برخی دارای آزادی آزاد باشند تا مدل با واقعیت همخوانی داشته باشد . مطابق شکل ۳-۱۳ در انتهای دال و تیرهای اصلی کف، قیود مشخص

شده است. [۲]

سپس خواص بتن و فولاد از قبیل مدول الاستیسیته و چگالی و ضریب پواسون و... تعریف می شود. نکته ای که می بایست بدان اشاره شود این است که در ضوابط بررسی ارتعاش کف مدول الاستیسیته بتن ۳۵٪ بزرگتر از مدول الاستیسیته محاسباتی معمول اتخاذ می گردد. این بدان علت است که بتن در وضعیت بارگذاری دینامیکی سختی بیشتری نسبت به بارگذاری استاتیکی از خود بروز می دهد (آلن و مورای ۱۹۹۳). [۳]



شکل ۳-۱۳: نمونه قیود گره ای در مدل سه بعدی [۲]

سمت چپ: قیود تیروتیر اصلیها

سمت راست: قیود دال بتنی

۲-۲-۳-۳ مدلسازی TMD

جهت مدلسازی ازالمان ارتباطی استفاده می شود این المان از نوع میراگر خطی^۱ تعریف می گردد که در این نوع المان مقادیر سختی و نیروی میرایی (نه نسبت میرایی) و در صورت لزوم جرم یا وزن خود فنرومیراگرها نیز وارد می شود . سپس با توجه به جهت کارکرد المان، در مدل هندسی جرم TMD در گره غیرمتصل به کف وارد می شود (شکل ۳-۱۲).

۴-۳ بارگذاری دینامیکی معادل راهنمای طراحی

۱-۴-۳ بارگذاری دینامیکی برای فعالیت راه رفتن

از ضمیمه الف بارگذاری دینامیکی معادل راهنمای طراحی آیین نامه AISC برای کاربریهای معمول اداری، مسکونی، تجاری و پل های عابر پیاده عبارت است از:

$$F(t) = [p_0 \exp(-0.35f_n)] \sin 2\pi f_n t \quad (۳-۱۹)$$

برای کاربری پل های عابر پیاده داخلی و خارجی از جدول ۳-۱ مقدار $p_0 = 0.41KN$ می باشد .
از همین جدول برای کاربری اداری، مسکونی و مراکز خرید مقدار $p_0 = 0.29KN$ بدست می آید.

پس از آنکه مدل اجزای محدود مطابق بند قبلی ایجاد شد. بار دینامیکی فوق الذکر در مرکز کف (بحرانی ترین مکان) بصورت متمرکز وارد می شود .

^۱ Linear Damper Link

۲-۴-۳ بارگذاری دینامیکی برای فعالیت‌های هماهنگ

ازممیمه ب باردینامیکی گسترده معادل راهنمای طراحی برای فعالیت‌های هماهنگ عبارت است از:

$$F_i(t) = \alpha w_p \sin 2\pi ft \quad (۲۰-۳)$$

که برای رقابت‌های ورزشی (کاربرد در فصل ۵) طبق جدول ۲-۳ خواهیم داشت:

برای هارمونیک اول :

$$\alpha_1 = 0.25, f_1 = 3\text{Hz}, w_p = 1.50\text{Kpa} = 153\text{kgf} / \text{m}^2 \Rightarrow \quad (۲۱-۳)$$

$$F_1(t) = 0.25 \times 153 \times \sin(2\pi \times 3t) \rightarrow F_1(t) = 38 \sin 6\pi t$$

برای هارمونیک دوم:

$$\alpha_2 = 0.05, f_2 = 5\text{Hz}, w_p = 1.50\text{Kpa} = 153\text{kgf} / \text{m}^2 \Rightarrow \quad (۲۲-۳)$$

$$F_2(t) = 0.05 \times 153 \times \sin(2\pi \times 5t) \rightarrow F_1(t) = 7.65 \sin 10\pi t$$

نتیجه اینکه برای کنترل ارتعاش کف برای فعالیت‌های هماهنگ کف را تحت نیروی هارمونیک

گسترده $F_i(t) = \alpha w_p \sin 2\pi ft$ قرارداده و سپس باتحلیل دینامیکی شتاب های منته هرهارمونیک را

جداگانه آورده آنگاه شتاب متوسط از رابطه زیر بدست خواهد آمد. [۱۴]

$$a_m = 1.5 \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^{1.5}} \quad (۲۳-۳)$$

درانتها شتاب متوسط محاسبه شده با شتاب مبنا(حد شتاب مطلوب برای راحتی انسان طبق

نمودار ۲-۸) مقایسه خواهد گردید.

فصل ۴ تئوری TMD

۱-۴ مقدمه

این فصل اختصاص به تئوری ریاضی TMD برای مودهای افقی وقائم دارد که درخصوص مود قائم (ارتعاش کف) به ارائه خلاصه ای از پارامترهای طراحی آن پرداخته شده و لازم به ذکر است مطالب عمده این فصل از مرجع [۱۵] می باشد. در پایان این فصل با جمع بندی صورت گرفته مراحل گام به گام طراحی TMD بصورت کاربردی ذکر گردیده و در فصل بعدی با ارائه مثالهایی نحوه استفاده از تئوری TMD عملاً بیان خواهد گردید.

در ابتدای این فصل سیستمهای یک درجه آزادی^۱ مجهز به TMD با حالت های مختلف میرایی بررسی می شود و پارامترهای بهینه طراحی TMD برای هر حالت بدست خواهد آمد. سپس با استفاده از خواص تعامد مود ها سیستم دودرجه آزادی به سیستمی یک درجه آزادی معادل سازی می شود. سپس سیستم دودرجه آزادی به سیستم چند درجه آزادی بسط و تعمیم داده میشود ، پس از تعیین تبدیلات مربوطه ، استفاده از پارامترهای طراحی TMD سیستم یک درجه آزادی برای سیستم چند درجه آزادی امکان پذیری باشد.

^۱ Single degree of freedom

۲-۴ تئوری TMD برای سیستم یک درجه آزادی

در آنچه که پیش رودارید حالت‌های مختلف از سیستم های بدون میرایی تا داشتن میرایی کامل تحلیل می شوند و مراحل طراحی ارائه خواهد شد.

۲-۴-۱ سیستم بدون میرایی - TMD بدون میرایی

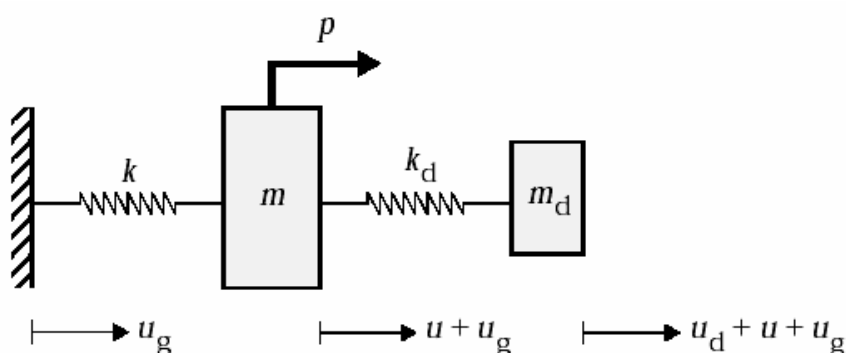
شکل ۱-۴ سیستمی یک درجه آزادی را نشان می دهد که دارای جرم m و سختی k می باشد که نسبت به هردونیروی خارجی و حرکت زمین طرح شده است. یک TMD با جرم m_d و سختی k_d به جرم اولیه متصل می شود. مقادیر مختلف تغییر مکان عبارتند از:

U_g : حرکت مطلق زمین؛ u : حرکت نسبی بین جرم اولیه و زمین و u_d : تغییر مکان نسبی بین میراگر و جرم

اولیه می باشد با این علائم معرفی شده ، معادلات حاکم فرمت های ذیل را خواهند داشت:

$$m_d[\ddot{u}_d + \ddot{u}] + k_d u_d = -m_d a_g \quad (۱-۴)$$

$$m\ddot{u} + ku - k_d u_d = -ma_g + p \quad (۲-۴)$$



شکل ۱-۴: سیستم یک درجه آزادی مجهز به TMD, [۱۵]

تحریک به عنوان بارتناوبی به فرکانس Ω در نظر گرفته می شود.

$$a_g = \hat{a}_g \sin \Omega t \quad (3-4)$$

$$p = \hat{p} \sin \Omega t \quad (4-4)$$

و واکنش سیستم به بارهای فوق الذکر به صورت زیر بیان می گردد.

$$u = \hat{u} \sin \Omega t \quad (5-4)$$

$$u_d = \hat{u}_d \sin \Omega t \quad (6-4)$$

و با جایگذاری این مقادیر معادلات تعادل به صورت زیر تبدیل می شوند:

$$[-m_d \Omega^2 + k_d] \hat{u}_d - m_d \Omega^2 \hat{u} = -m_d \hat{a}_g \quad (7-4)$$

$$-k_d \hat{u}_d + [-m \Omega^2 + k] \hat{u} = -m \hat{a}_g + \hat{p} \quad (8-4)$$

پس از حل معادلات داریم:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k} \left(\frac{1 - \rho_d^2}{D_1} \right) - \frac{m \hat{a}_g}{k} \left(\frac{1 + \bar{m} - \rho_d^2}{D_1} \right) \quad (9-4)$$

$$\hat{u}_d = \frac{\hat{p}}{k_d} \left(\frac{\bar{m} \rho_d^2}{D_1} \right) - \frac{m \hat{a}_g}{k_d} \left(\frac{\bar{m}}{D_1} \right) \quad (10-4)$$

که در آن:

$$D_1 = [1 - \rho^2][1 - \rho_d^2] - \bar{m}\rho^2 \quad (11-4)$$

که ρ و ρ_d نسبت‌های بی بعد فرکانس هستند.

$$\rho = \frac{\Omega}{\omega} = \frac{\Omega}{\sqrt{k/m}} \quad (12-4)$$

$$\rho_d = \frac{\Omega}{\omega_d} = \frac{\Omega}{\sqrt{k_d/m_d}} \quad (13-4)$$

با انتخاب نسبت جرمی و نسبت فرکانس میراگر که رابطه زیر در آن برقرار باشد:

$$1 - \rho_d^2 + \bar{m} = 0 \quad (14-4)$$

حل معادله به صورت زیر کاهش می یابد.

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k} \quad (15-4)$$

$$\hat{u}_d = -\frac{\hat{p}}{k_d}\rho^2 + \frac{m\hat{a}_g}{k_d} \quad (16-4)$$

این انتخاب، جرم اولیه را از حرکت زمین جدا می کند و پاسخ مربوط به بار خارجی را به مقدار شبه

استاتیکی $\frac{\hat{p}}{k}$ کاهش می دهد. حدود معمول برای انتخاب نسبت جرم TMD به جرم سیستم ($\bar{m}$)

(از یکصدم تا یکدهم می باشد).

پس فرکانس میراگر بهینه خیلی به فرکانس اعمالی نزدیک است. رابطه دقیق از معادله ۴-۱۴ نتیجه می

شود.

$$\omega_d|_{\text{opt}} = \frac{\Omega}{\sqrt{1+\bar{m}}} \quad (۱۷-۴)$$

می توان سختی میراگر را با این رابطه تعیین نمود:

$$k_d|_{\text{opt}} = [\omega_d|_{\text{opt}}]^2 m_d = \frac{\Omega^2 m \bar{m}}{1+\bar{m}} \quad (۱۸-۴)$$

سرانجام با جایگزینی k_d معادله ۴-۱۶ به شکل زیر خواهد بود:

$$\hat{u}_d = \frac{1+\bar{m}}{\bar{m}} \left(\left| \frac{\hat{p}}{k} \right| + \left| \frac{\hat{a}_g}{\Omega^2} \right| \right) \quad (۱۹-۴)$$

می توان مقدار تغییر مکان نسبی میراگر را مشخص نمود و $(\bar{m})$ را با معادله ۴-۱۹ تعیین کرد. با معلوم بودن $(\bar{m})$ و (Ω) سختی با استفاده از معادله ۴-۱۸ بدست می آید. باید توجه کرد که این سختی برای یک فرکانس اعمالی بخصوص بکار میرود. وقتی که خواص میراگر جرمی تعیین گردد، معادلات ۴-۹ و ۴-۱۰ برای تعیین نمودن پاسخ بار با فرکانس اعمالی مختلف می توانند مورد استفاده واقع شوند. جرم اولیه در این حالت تحت تحریک حرکت زمین جابجا خواهد شد.

۲-۲-۴ سیستم بدون میرایی-TMD با میرایی

پیچیدگی دیگری که وجود دارد وجود میرایی میراگر جرمی است که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. معادلات حرکت در این مورد عبارتند از:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (۲۰-۴)$$

$$m\ddot{u} + ku - c_d\dot{u}_d - k_d u_d = -ma_g + p \quad (21-4)$$

وجود مقادیر میرایی در معادلات ۴-۲۰ و ۴-۲۱ بین حرکت تناوبی و پاسخ، اختلاف فاز ایجاد می کند. بهتر است که از ابتدا روی راه حلی کار شود که بر حسب مقادیر پیچیده بیان می شود، می توان تحریک را به صورت زیر بیان نمود:

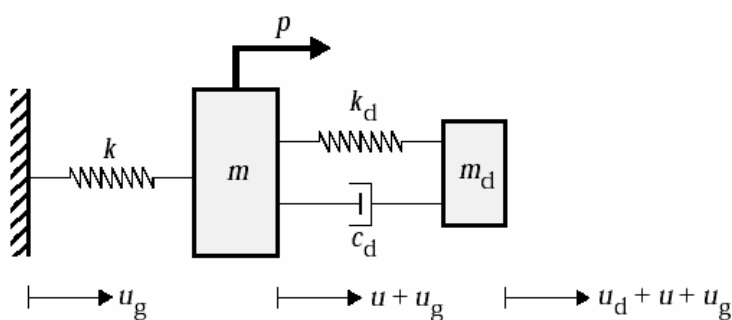
$$a_g = \hat{a}_g e^{i\Omega t} \quad (22-4)$$

$$p = \hat{p} e^{i\Omega t} \quad (23-4)$$

که در آن $\hat{p}$ و $\hat{a}_g$ مقادیر حقیقی هستند. پاسخ بصورت زیر منظور می گردد:

$$u = \bar{u} e^{i\Omega t} \quad (24-4)$$

$$u_d = \bar{u}_d e^{i\Omega t} \quad (25-4)$$



شکل ۴-۲: مدل سیستم یک درجه آزادی فاقد میرایی مجهز به TMD با میرایی [۱۵]

که در آن دامنه های مربوط به پاسخ، یعنی $\bar{u}, \bar{u}_d$ مقادیر پیچیده ای می باشند. قسمتهای حقیقی و موهومی a_g مربوط به ورودی کسینوسی و سینوسی می باشند. در ادامه راه حل مربوط به قسمت حقیقی (کسینوسی) و موهومی (سینوسی) ارائه می گردد. با جایگذاری معادلات ۴-۲۴ و ۴-۲۵ در معادلات حاکم و حذف عبارت $e^{i\Omega t}$ از طرفین معادلات خواهیم داشت:

$$[-m_d\Omega^2 + ic_d\Omega + k_d]\bar{u}_d - m_d\Omega^2\bar{u} = -m_d\hat{a}_g \quad (۴-۲۶)$$

$$-[ic_d\Omega + k_d]\bar{u}_d + [-m\Omega^2 + k]\bar{u} = -m\hat{a}_g + \hat{p} \quad (۴-۲۷)$$

حل معادلات حاکم نتایج زیر را می دهد:

$$\bar{u} = \frac{\hat{p}}{kD_2} [f^2 - \rho^2 + i2\xi_d\rho f] - \frac{\hat{a}_g m}{kD_2} [(1 + \bar{m})f^2 - \rho^2 + i2\xi_d\rho f(1 + \bar{m})] \quad (۴-۲۸)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\hat{p}\rho^2}{kD_2} - \frac{\hat{a}_g m}{kD_2} \quad (۴-۲۹)$$

$$D_2 = [1 - \rho^2][f^2 - \rho^2] - \bar{m}\rho^2 f^2 + i2\xi_d\rho f[1 - \rho^2(1 + \bar{m})] \quad (۴-۳۰)$$

$$f = \frac{\omega_d}{\omega} \quad (۴-۳۱)$$

ρ و بعنوان نسبت Ω/ω (معادله ۴-۱۲) تعریف می شود. با تبدیل این شکلهای پیچیده به فرم قطبی به نتایج زیر می رسیم:

$$\bar{u} = \frac{\hat{p}}{k} H_1 e^{i\delta_1} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_2 e^{i\delta_2} \quad (32-4)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\hat{p}}{k} H_3 e^{-i\delta_3} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_4 e^{-i\delta_3} \quad (33-4)$$

که فاکتورهای H، مقادیر بزرگنمایی پاسخ های شبه استاتیکی را تعریف می کنند و مقادیر δ زوایای فازی بین پاسخ و تحریک هستند. ترم های مختلف H و δ در زیر آورده می شود:

$$H_1 = \frac{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}}{|D_2|} \quad (34-4)$$

$$H_2 = \frac{\sqrt{[(1+\bar{m})f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f(1+\bar{m})]^2}}{|D_2|} \quad (35-4)$$

$$H_3 = \frac{\rho^2}{|D_2|} \quad (36-4)$$

$$H_4 = \frac{1}{|D_2|} \quad (37-4)$$

$$|D_2| = \sqrt{([1 - \rho^2][f^2 - \rho^2] - \bar{m}\rho^2 f^2)^2 + (2\xi_d \rho f[1 - \rho^2(1 + \bar{m})])^2} \quad (38-4)$$

$$\delta_1 = \alpha_1 - \delta_3 \quad (39-4)$$

$$\delta_2 = \alpha_2 - \delta_3 \quad (40-4)$$

$$\tan \delta_3 = \frac{2\xi_d \rho f [1 - \rho^2 (1 + \bar{m})]}{[1 - \rho^2][f^2 - \rho^2] - \bar{m} \rho^2 f^2} \quad (41-4)$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{2\xi_d \rho f}{f^2 - \rho^2} \quad (42-4)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{2\xi_d \rho f (1 + \bar{m})}{(1 + \bar{m}) f^2 - \rho^2} \quad (43-4)$$

پس از بررسی دقیق و کامل مربوط به حالت بارگذاری خارجی با استفاده از نمادهای فرمول معادل با

این فصل، پارامترهای بهینه مربوط به سیستم بدون میرایی و TMD بامیرایی به شرح ذیل ارائه می

گردد (Den hartog 1956). [۱۶]

$$\xi_d \Big|_{opt.} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1+\bar{m})^3}} \quad (44-4)$$

$$f \Big|_{opt.} = \frac{1}{1 + \bar{m}} \quad (45-4)$$

طبق رابطه ۷-۱ مرجع [۳]

$$\xi_e = 0.5\sqrt{\bar{m}} \quad (46-4)$$

از آنجا که در بند بعدی حالت جامع سیستم و TMD بامیرایی بطور کامل بررسی می گردد بحث

مفصل تری در خصوص پارامترهای بهینه TMD، در قسمت بعدی بیان خواهد شد.

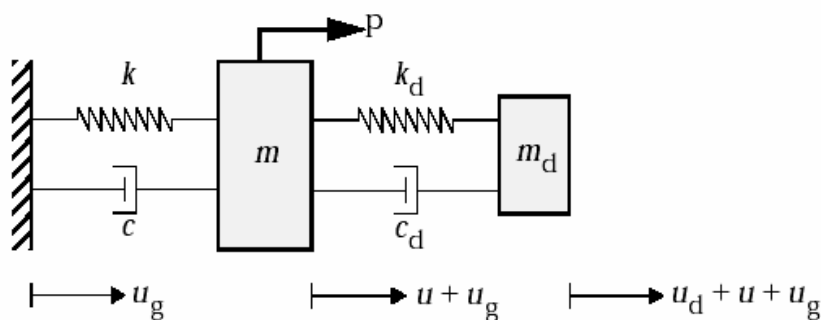
۳-۲-۴ سیستم بامیرایی - TMD با میرایی

همه سیستمهای حقیقی مقداری میرایی دارند. از آنجاییکه یک جذب کننده انرژی را می توان به سیستم با میرایی کم اضافه نمود، ارزیابی اثر میرایی در یک سیستم واقعی بر روی تنظیم بهینه جذب کننده انرژی، از ملاحظات مهم طراحی است.

سیستم اصلی در شکل ۳-۴ جرم m ، سختی k و میرایی c را شامل می شود. سیستم TMD جرم m_d ، سختی k_d و میرایی c_d دارد. با این ملاحظه که سیستم، نسبت به هردوی بار خارجی و تحریک زمین طرح شود، معادلات حرکت عبارتند از:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (۴۷-۴)$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p \quad (۴۸-۴)$$



شکل ۳-۴: سیستم یک درجه آزادی با میرایی و TMD با میرایی [۱۵]

با استفاده از روش مشابه آنچه که برای حالت بدون میرایی بیان شد، راه حل مربوط به تحریک

تناوبی (هم O و هم U_g) به شکل قطبی بیان می شوند:

$$\bar{u} = \frac{\hat{p}}{k} H_5 e^{i\delta_5} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_6 e^{i\delta_6} \quad (49-4)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\hat{p}}{k} H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_8 e^{i\delta_8} \quad (50-4)$$

ترم های مختلف H و δ به شکل زیرین تعریف می شوند:

$$H_5 = \frac{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}}{|D_3|} \quad (51-4)$$

$$H_6 = \frac{\sqrt{[(1 + \bar{m}) f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f(1 + \bar{m})]^2}}{|D_3|} \quad (52-4)$$

$$H_7 = \frac{\rho^2}{|D_3|} \quad (53-4)$$

$$H_8 = \frac{\sqrt{1 + [2\xi \rho]^2}}{|D_3|} \quad (54-4)$$

$$|D_3| = \{[-f^2 \rho^2 \bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4\xi \xi_d f \rho^2]^2 + 4[\xi \rho(f^2 - \rho^2) + \xi_d f \rho(1 - \rho^2(1 + \bar{m}))^2]\} \quad (55-4)$$

$$\delta_5 = \alpha_1 - \delta_7 \quad (56-4)$$

$$\delta_6 = \alpha_2 - \delta_7 \quad (57-4)$$

$$\delta_8 = \alpha_3 - \delta_7 \quad (58-4)$$

$$\tan \delta_7 = 2 \frac{\xi \rho (f^2 - \rho^2) + \xi_d f \rho (1 - \rho^2 (1 + \bar{m}))}{-f^2 \rho^2 \bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4 \xi \xi_d f \rho^2} \quad (59-4)$$

$$\tan \alpha_3 = 2 \xi \rho \quad (60-4)$$

ترم های α_1, α_2 توسط معادلات ۴۲-۴ و ۴۳-۴ تعریف می شوند.

در ادامه ،حالتی که یک بار خارجی به جرم اولیه اعمال میگردد، در نظر گرفته می شود. از آنجاییکه

|D 3| شامل ξ است ،نمی توان توصیف تحلیلی فرکانس تنظیم شده بهینه ونسبت میرایی بهینه

را بر حسب نسبت جرمی بدست آورد. در این حالت ،این پارامترها به مقدار ξ نیز وابسته هستند. شبیه

سازی های عددی را می توان به کاربرد تا برای دامنه ای از ρ با مقادیر مشخص $\bar{m}, \xi_d, f, \xi$

مقادیر H5, H7 ارزیابی گردند.

با مقادیر مشخص $\bar{m}, \xi$ مقدار H5 بر حسب ρ برای دامنه ای از f و ξ_d ترسیم می شود. هر منحنی $H5-\rho$

یک مقدار بیشینه H5 دارد.

ترکیب ویژه ای از f و ξ_d که به مقدار کمترین پیک H5 مربوط می شود، به عنوان حالت بهینه

در نظر گرفته می شود. با تکرار پروسه برای مقادیر مختلف $\bar{m}, \xi$ اطلاعات رفتاری مورد نیاز برای طراحی

سیستم میراگر بدست می آیند. شکل ۴-۴ تغییرات مقدار حداکثر H5 برای حالت بهینه را نشان می دهد.

پاسخ مربوط به میراگر در شکل ۴-۵ ترسیم شده است. افزودن میرایی به جرم اولیه اثر قابل توجهی برای

مقادیر کوچک $\overline{m}$ دارد. با توجه به معادلات ۴-۴۹ و ۴-۵۰ نسبت تغییر مکان میراگر به تغییر مکان جرم اولیه به صورت زیر است:

$$\frac{|\hat{u}_d|}{|\hat{u}|} = \frac{H_7}{H_5} = \frac{\rho^2}{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}} \quad (۴-۶۱)$$

از آنجایی که ξ کوچک است، نسبت اساساً مستقل از ξ می باشد.

شکل ۴-۶ این مطلب را تایید می کند. مقادیر بهینه فرکانس و نسبت های میرایی که در پروسه شبیه سازی بدست آمده اند، در شکل ۴-۷ و ۴-۸ ترسیم شده اند.

طبق رابطه ۳-۳۳ مرجع [۱۷] ضریب پاسخ دینامیکی در حالت رزونانس تحت بار هارمونیک، در حالت تغییر مکان به شکل زیر می باشد.

$$H = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (۴-۶۲)$$

از آنجایی که ξ کوچک است، یک تخمین معقول عبارت است از:

$$H \approx \frac{1}{2\xi} \Rightarrow \xi_e = \frac{1}{2H_5} \Big|_{opt}. \quad (۴-۶۳)$$

با استفاده از رابطه ۴-۶۳ در شکل ۴-۹ تغییرات نسبت میرایی معادل سیستم (ξ_e) با $\xi, \overline{m}$ نشان داده می شود.

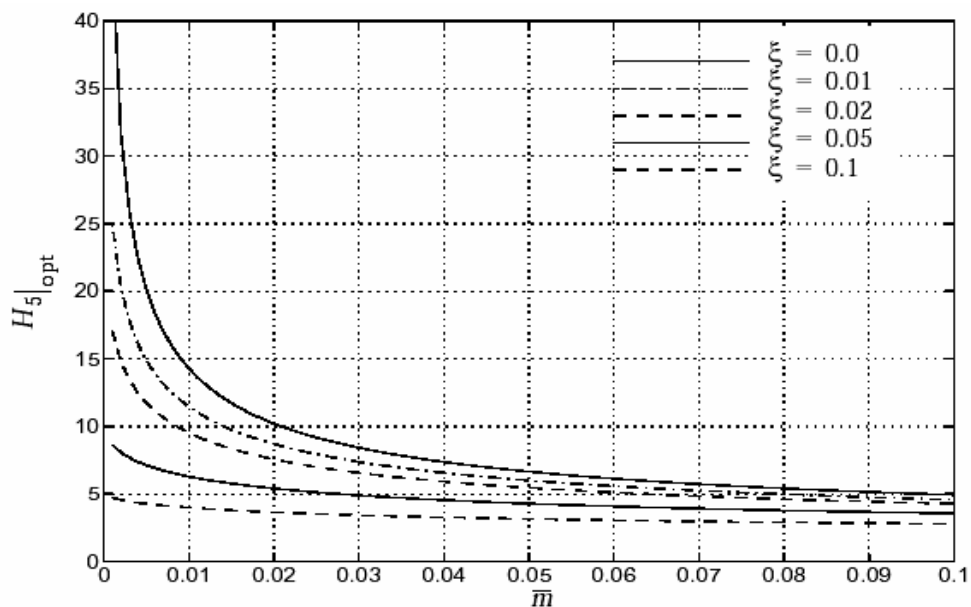
Tsai, Lin (۱۹۹۳) معادلاتی را برای پارامترهای تنظیم بهینه f, ξ_d پیشنهاد کردند که با منطق نمودن

منحنی هایی تعیین شده اند. این معادلات عبارتند از: [۱۸]

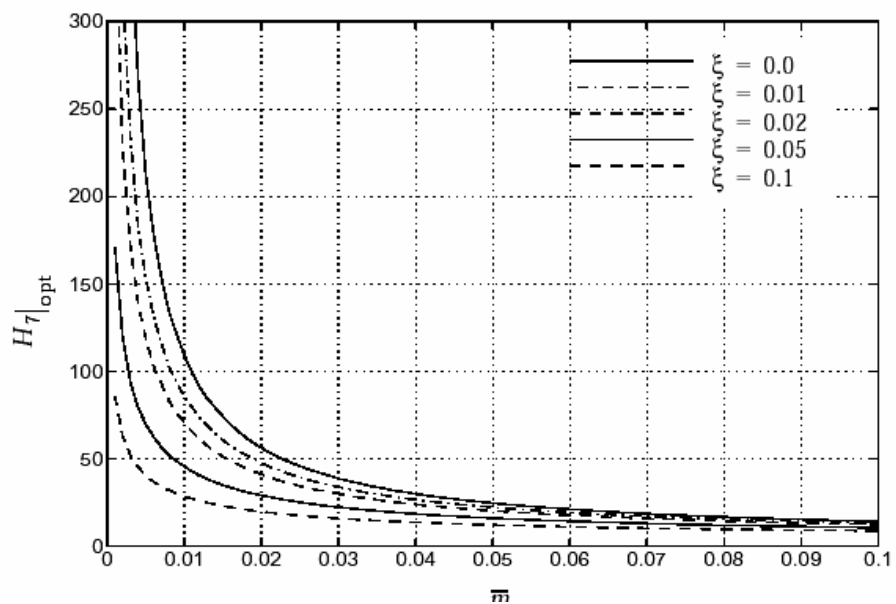
$$f = \left(\frac{\sqrt{1-0.5\bar{m}}}{1+\bar{m}} + \sqrt{1-2\xi^2} - 1 \right) - [2.375 - 1.034\sqrt{\bar{m}} - 0.426\bar{m}]\xi\sqrt{\bar{m}} - (3.730 - 16.903\sqrt{\bar{m}} + 20.496\bar{m})\xi^2\sqrt{\bar{m}} \quad (4.1)$$

(۴-۶۴)

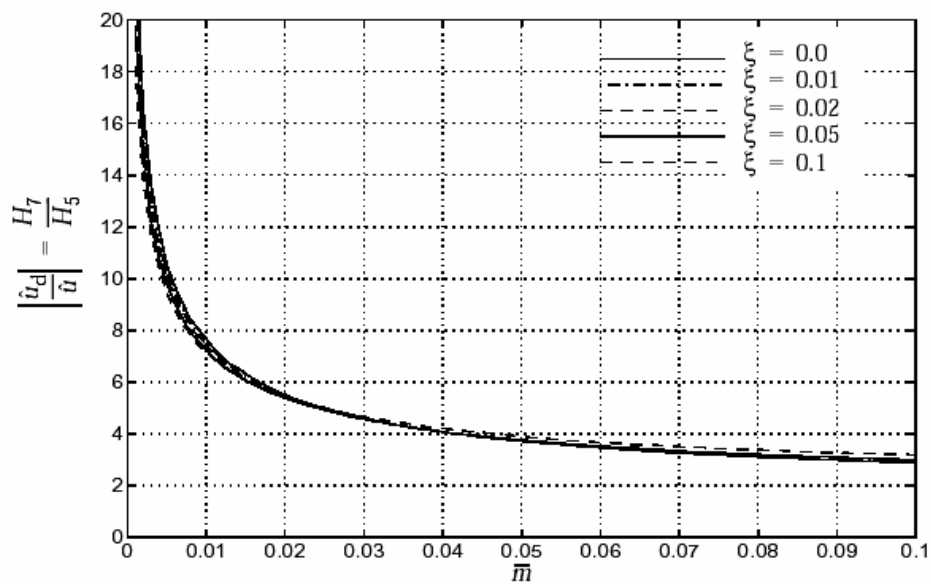
$$\xi_d = \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1+\bar{m})(1-0.5\bar{m})}} + (0.151\xi - 0.170\xi^2) \quad (4-۶۵)$$



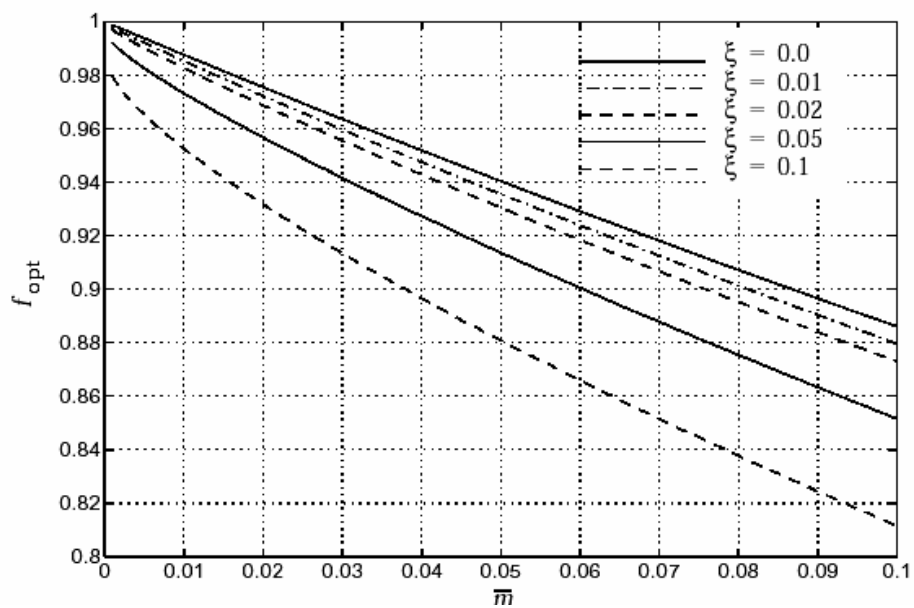
شکل ۴-۴: ضرایب بزرگنمایی دینامیکی حداکثر برای سیستم یک درجه آزادی با میرایی [۱۵]



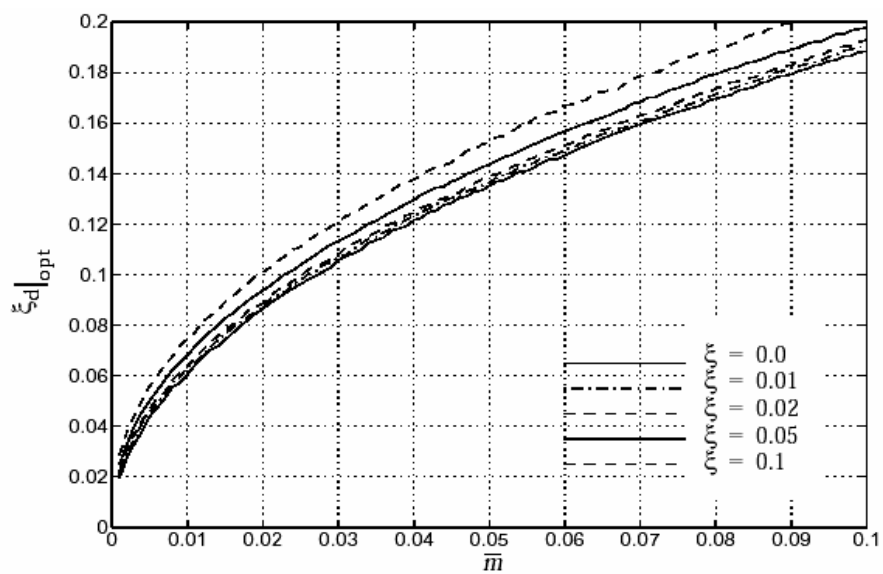
شکل ۴-۵: ضرایب بزرگنمایی دینامیکی حداکثر برای TMD [۱۵]



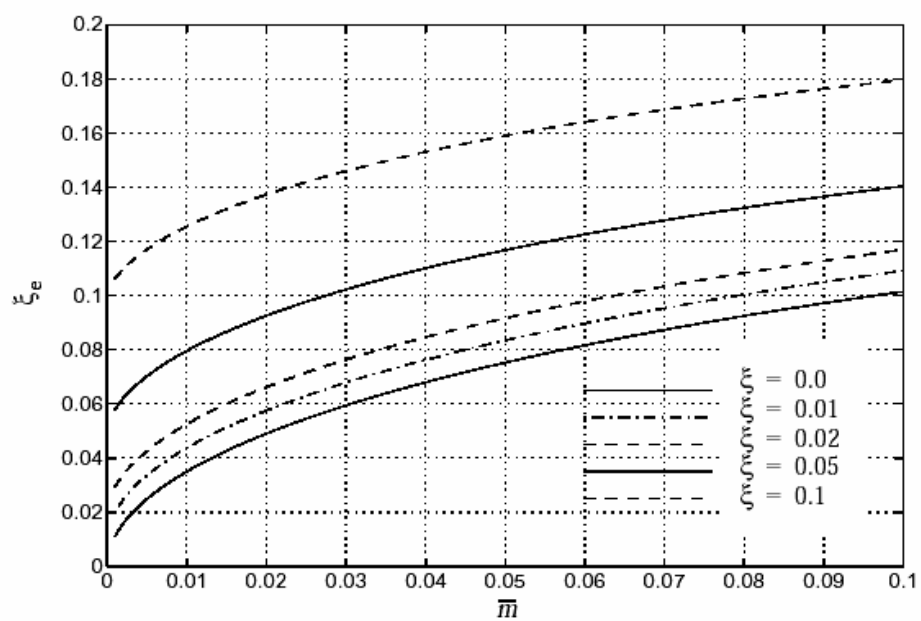
شکل ۴-۶: نسبت دامنه حداکثر TMD به دامنه حداکثر سیستم [۱۵]



شکل ۴-۷: نسبت فرکانس تنظیم شده بهینه برای TMD و f_{opt} [۱۵]



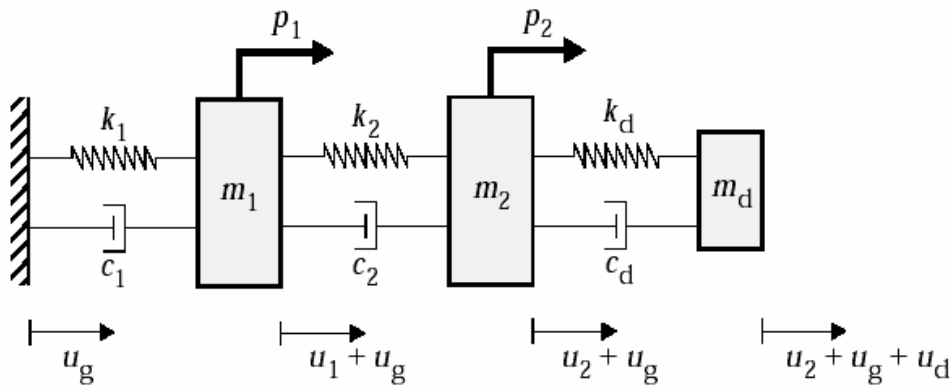
شکل ۴-۸: نسبت میرایی بهینه TMD [۱۵]



شکل ۴-۹: رابطه نسبت میرایی معادل TMD و جرم نسبی با میرایی موجود سیستم [۱۵]

۳-۴ تئوری TMD برای سیستم چنددرجه آزادی^۱

در این مرحله تئوری یک درجه آزادی را که قبلاً ارائه گردید، بسط داده می شود تا سیستم چند درجه آزادی را که شامل تعدادی میراگرهای جرمی تنظیم شده واقع در سراسر سازه است، دربرگیرد. البته کاربرد عملی این تئوری در فصل ۵ بیان خواهد شد.



شکل ۴-۱۰: سیستم ۲ درجه آزادی با TMD [۱۵]

در ابتدا یک سیستم دودرجه آزادی که شامل یک میراگر متصل شده به جرم ۲ می باشد، در نظر داشته باشید تا بتوان ایده های اساسی را از آن استخراج نمود.

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 - k_2 (u_2 - u_1) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = p_1 - m_1 \ddot{u}_g \quad (۴-۶۶)$$

^۱ Multi degree of freedom

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_2(u_2 - u_1) - k_d u_d - c_d \dot{u}_d = p_2 - m_2 \ddot{u}_g \quad (67-4)$$

$$m_d \ddot{u}_d + k_d u_d + c_d \dot{u}_d = -m_d(\ddot{u}_2 + \ddot{u}_g) \quad (68-4)$$

گام اساسی و کلیدی ترکیب معادلات ۴-۶۶ و ۴-۶۷ و بیان معادله منتهی در شکل مشابه حالت یک درجه آزادی است این کار، مساله را به سیستم یک درجه آزادی کاهش می دهد. رویکردی که در اینجا مطرح می شود براساس تبدیل معادله ماتریس اصلی به شکل معادلات مودال اسکالرمی باشد. با استفاده از نماد ماتریسی، معادلات ۴-۶۶ و ۴-۶۷ به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \begin{bmatrix} p_1 - m_1 a_g \\ p_2 - m_2 a_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_d u_d + c_d \dot{u}_d \end{bmatrix} \quad (69-4)$$

که ماتریس های مختلف عبارتند از:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (70-4)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (71-4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (72-4)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (73-4)$$

با جایگذاری $\mathbf{U}$ بصورت بردارها ومختصات مودال:

$$\mathbf{U} = \Phi_1 q_1 + \Phi_2 q_2 \quad (74-4)$$

بردارهای مودال روابط عمود برهم (ارتوگنال) زیرین را ارضا می کنند.

$$\Phi_j^T \mathbf{K} \Phi_i = \delta_{ij} \omega_j^2 \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_i \quad (75-4)$$

با تعریف جرم مودال وترم های سختی ومیرایی:

$$\tilde{m}_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j \quad (76-4)$$

$$\tilde{k}_j = \Phi_j^T \mathbf{K} \Phi_j = \omega_j^2 \tilde{m}_j \quad (77-4)$$

$$\tilde{c}_j = \Phi_j^T \mathbf{C} \Phi_j \quad (78-4)$$

وبیان المانهای φ_j بصورت:

$$\Phi_j = \begin{bmatrix} \Phi_{j1} \\ \Phi_{j2} \end{bmatrix} \quad (79-4)$$

وبا فرض اینکه میرایی با سختی متناسب است:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{K} \quad (80-4)$$

یک سری معادلات مستقل برای q_1, q_2 بدست می آیند:

$$\begin{aligned} \ddot{m}_j \ddot{q}_j + \ddot{c}_j \dot{q}_j + \ddot{k}_j q_j = \Phi_{j1}(p_1 - m_1 a_g) \quad j = 1, 2 \\ + \Phi_{j2}(p_2 - m_2 a_g + k_d u_d + c_d \dot{u}_d) \end{aligned} \quad (۸۱-۴)$$

با این فرض، نسبت میرایی مودال به ترتیب زیر داده می شود:

$$\xi_j = \frac{\ddot{c}_j}{2\omega_j \ddot{m}_j} = \frac{\alpha\omega_j}{2} \quad (۸۲-۴)$$

معادله ۸۱-۴ دو معادله را ارائه می کند. هر معادله یک سیستم یک درجه آزادی بخصوص را که جرم سختی و میرایی مساوی $\xi, \ddot{m}, \ddot{k}$ دارد، تعریف می نماید. از آنجاییکه TMD برای دامنه های فرکانسی باعرض کم موثر است مجبوریم که تصمیم بگیریم که کدامین پاسخ رزونانسی مودال در TMD کنترل کننده است. وقتی که این تصمیم اتخاذ شد، تحلیل با استفاده از معادله مودی انتخابی و معادله اولیه TMD ((یعنی معادله ۶۸-۴)) ادامه می یابد.

فرض کنید پاسخ مودی اول کنترل کننده است. با در نظر گرفتن $z=1$ در معادله ۸۱-۴ به معادله زیر می رسیم :

$$\begin{aligned} \ddot{m}_1 \ddot{q}_1 + \ddot{c}_1 \dot{q}_1 + \ddot{k}_1 q_1 = \Phi_{11} p_1 + \Phi_{12} p_2 \\ - [m_1 \Phi_{11} + m_2 \Phi_{12}] a_g + \Phi_{12} [k_d u_d + c_d \dot{u}_d] \end{aligned} \quad (4.1) \quad (۸۳-۴)$$

در حالت کلی، u_2 با جمع آثار قوای مودی (مشارکت های مودی) بدست می آید:

$$u_2 = \Phi_{12} q_1 + \Phi_{22} q_2 \quad (۸۴-۴)$$

بعلت اینکه فرکانس بار خارجی در حد 1 ω است، پاسخ مود اول غالب خواهد بود و معقول است که فرض کنیم:

$$u_2 \approx \Phi_{12} q_1 \quad (۸۵-۴)$$

باحل 1 q خواهیم داشت:

$$q_1 = \left[\frac{1}{\Phi_{12}} \right] u_2 \quad (۸۶-۴)$$

و با جایگذاری در معادله ۴-۸۳ بدست می آوریم:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_{1e} \ddot{u}_2 + \tilde{c}_{1e} \dot{u}_2 + \tilde{k}_{1e} u_2 = k_d u_d + c_d \dot{u}_d \\ + \tilde{p}_{1e} - \Gamma_{1e} \tilde{m}_{1e} a_g \end{aligned} \quad (۸۷-۴)$$

$$\tilde{m}_{1e} = \left[\frac{1}{\Phi_{12}^2} \right] \tilde{m}_1 \quad (۸۸-۴)$$

$$\tilde{k}_{1e} = \left[\frac{1}{\Phi_{12}^2} \right] \tilde{k}_1 \quad (۸۹-۴)$$

$$\tilde{c}_{1e} = \alpha \tilde{k}_{1e} \quad (۹۰-۴)$$

$$\tilde{p}_{1e} = \frac{\Phi_{11}p_1 + \Phi_{12}p_2}{\Phi_{12}} \quad (91-4)$$

$$\Gamma_{1e} = \frac{\Phi_{12}}{\tilde{m}_1}(m_1\Phi_{11} + m_2\Phi_{22}) \quad (92-4)$$

که $P_{le}, K_{le}, C_{le}, \tilde{m}_{le}, \Gamma_{le}$ پارامترهای معادل سیستم یک درجه آزادی را برای ترکیب مود ۱ و گره ۲ را

که TMD به آن متصل می شود نشان می دهد. معادلات آنها عبارتند از:

معادله ۴-۸۷ در شکل کلی به معادلات یک درجه آزادی که در فصل قبل بودند شبیه هستند.

هر دوسری معادلات در زیر مقایسه می شوند:

معادلات مربوط به TMD:

$$\begin{aligned} m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d &= -m_d(\ddot{u} - a_g) \\ \text{vs} \\ m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d &= -m_d(\ddot{u}_2 - a_g) \end{aligned} \quad (93-4)$$

معادله جرم اولیه :

$$\begin{aligned} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku &= c_d \dot{u}_d + k_d u_d + p - ma_g \\ \text{vs} \\ \tilde{m}_{1e} \ddot{u}_2 + \tilde{c}_{1e} \dot{u}_2 + \tilde{k}_{1e} u_2 &= c_d \dot{u}_d + k_d u_d + \tilde{p}_{1e} - \Gamma_{1e} \tilde{m}_{1e} a_g \end{aligned} \quad (94-4)$$

و با در نظر گرفتن روابط معادل بین سیستم چند درجه آزادی بایک درجه آزادی به شرح ذیل:

$$\begin{aligned} u_2 &\equiv u & \tilde{m}_{1e} &\equiv m & \tilde{c}_{1e} &\equiv c & \tilde{k}_{1e} &\equiv k \\ \tilde{p}_{1e} &\equiv p & \Gamma_{1e} &\equiv \Gamma \end{aligned} \quad (95-4)$$

آنگاه معادلات جرم اولیه برای سیستم چند درجه آزادی به صورت زیرین تبدیل می شود:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = c_d \dot{u}_d + k_d u_d + p - \Gamma m a_g \quad (96-4)$$

که از معادله یک درجه آزادی به اندازه ضریب Γ تفاوت دارد. بنابراین، حل مساله برای تحریک زمین که قبلاً ارائه شد باید اصلاح شود تا وجود Γ بحساب آید. البته چون در ارتعاش کف با این ترم سروکار نداریم از ادامه جزئیات مربوطه خودداری می شود.

لذا مراحل گام به گام جهت طراحی TMD برای سیستم چند درجه آزادی به شرح ذیل خواهد بود.

- ۱- نسبت جرم TMD به جرم سیستم ($\bar{m}$) انتخاب می گردد (در محدوده ۱ تا ۱۰٪).
- ۲- پس از تعیین ($\bar{m}$) و انتخاب میرایی موجود کف (ξ) با مراجعه به اشکال ۴-۷ و ۴-۸ می توان فرکانس تنظیمی و نسبت میرایی میراگر را بدست آورد.
- ۳- پس از تحلیل مودال به روش دستی یا روش اجزای محدود به کمک نرم افزار SAP2000 اشکال مودی بدست می آید.
- ۴- پس از تعیین جرم موثر مودال (بسته به مود انتخاب) از رابطه ۴-۸۸ به شرح ذیل پارامترهای طراحی بدست خواهند آمد.

$$m_d = \bar{m} \tilde{m}_{1e} \quad (97-4)$$

$$\omega_d = f_{opt} \omega_1 \quad (98-4)$$

$$c_d = 2\xi_d \Big|_{opt} \omega_d m_d \quad (99-4)$$

با بسط دادن فرم میراگر:

$$m_d = \bar{m} \tilde{m}_{1e} = \frac{\bar{m}[\Phi_1^T M \Phi_1]}{\Phi_{12}^2} \quad (۱۰۰-۴)$$

که نشان می دهد باید محل TMD رابه نحوی انتخاب نمود که با دامنه حداکثر شکل مودی کنترل کننده منطبق باشد. دراین حالت،مود اول،مود هدف است و φ_{12} دامنه حداکثر φ_1 می باشد.

این امر(استنتاج مود اول) می تواند تعمیم داده شود تا فرکانس مود λ تنظیم کننده باشد.

حالت عمومی یک سیستم چند درجه آزادی با میراگر جرمی تنظیم شده متصل به درجه آزادی n ام به روش مشابه بیان می شود. با استفاده ازعلائم تعریف شده قبلی،معادله مود λ ام به صورت زیر بیان می شود.

$$\tilde{m}_j \ddot{q}_j + \tilde{c}_j \dot{q}_j + \tilde{k}_j q_j = \tilde{p}_j + \Phi_{jn} [k_d u_d + c_d \dot{u}_d] \quad j = 1, 2, \dots \quad (۱۰۱-۴)$$

که $\tilde{p}_j$ نیروی مودی مربوط به حرکت زمین وبارگذاری خارجی را نشان می دهد وجزئی از φ_j است که مربوط به تغییر مکانی n ام آن است. برای کنترل پاسخ مودی i ام، $i=1,2,\dots,n$ ، در معادله ۴-۸۶ قرارداد می شود و تخمین زیر منظور می گردد.

$$q_i \approx \left[\frac{1}{\Phi_{in}} \right] u_n \quad (۱۰۲-۴)$$

یعنی درمود i ام که TMD به درجه آزادی n وصل شده است.

این جایگذاریها معادله زیر را برای u_n نتیجه می دهد.

$$\tilde{m}_{ie} \ddot{u}_n + \tilde{c}_{ie} \dot{u}_n + \tilde{k}_{ie} u_n = \tilde{p}_{ie} + k_d u_d + c_d \dot{u}_d \quad (۱۰۳-۴)$$

که داریم:

$$\tilde{m}_{ie} = \left[\frac{1}{\Phi_{in}^2} \right] \tilde{M}_i = \left[\frac{1}{\Phi_{in}^2} \right] \Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i$$

$$\tilde{k}_{ie} = \omega_i^2 \tilde{m}_{ie}$$

$$\tilde{c}_{ie} = \alpha \tilde{k}_{ie}$$

$$\tilde{p}_{ie} = \frac{1}{\Phi_{in}} \tilde{p}_i$$

(۱۰۴-۴)

گامهای باقیمانده مشابه همان هایی هستند که قبلاً توصیف شده است در نتیجه:

$$m_d = \bar{m} \tilde{m}_{ie} = \left[\frac{\bar{m}}{\Phi_{in}^2} \right] \Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i$$

$$\omega_d = f_{opt} \omega_i$$

(۱۰۵-۴)

مفهوم این است که میراگر جرمی بهینه برای مودها انتخاب n (درجه آزادی با تغییر شکل حداکثر)

بدست می آید.

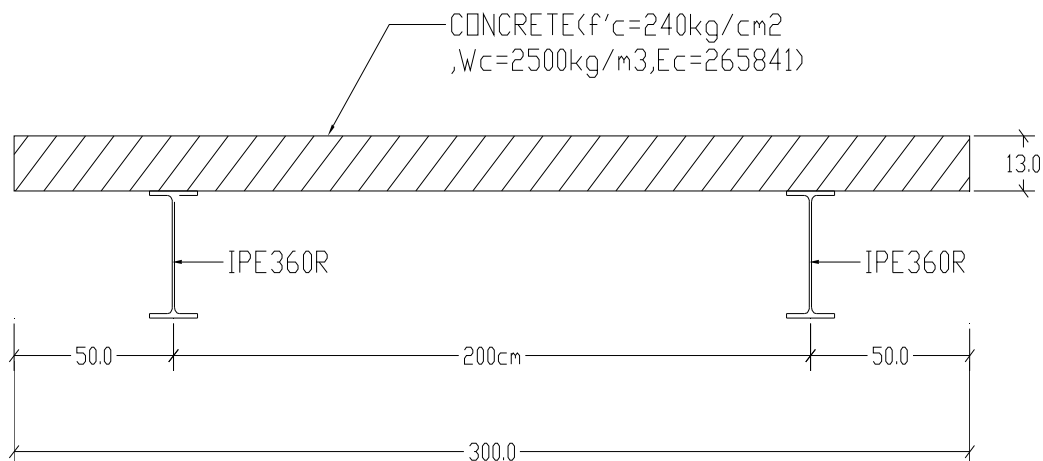
فصل ۵ کاربرد عملی TMD

در این فصل با استفاده از نتایج بدست آمده از فصل قبلی (تئوری TMD) نسبت به ارائه مثالهای عملی از کاربرد TMD در پل عابر پیاده، اداره الکترونیکی (فعالیت ناشی از راه رفتن) و سالن ورزشی کشتی (فعالیت هماهنگ) پرداخته شده و در هر مورد نتایج ذکر گردیده و مقایسه ای با روش معمول افزایش سختی (تقویت سازه ای) انجام می گردد.

۱-۵ کاربرد TMD در پل عابر پیاده

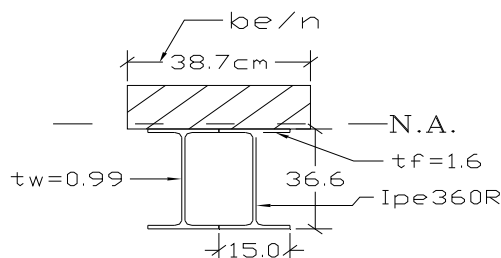
مشخصات فنی کف:

عرض پل ۳ متر و طول آن ۱۲ متر؛ پل در تکیه گاه بصورت مفصلی، کاربرد در فضای داخلی فروشگاهها و مراکز خرید، دارای میرایی کم و بصورت کامپوزیت بتنی و فولادی می باشد (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵: مقطع عرض پل عابر پیاده بصورت کاملاً کامپوزیت

۵-۱-۱ طراحی براساس ارضای معیارمقاومت وخیز



شکل ۵-۲: مقطع تبدیل یافته به فولاد در طراحی براساس مقاومت

درپل عابریاده

براساس آیین نامه فولاد ایران (آفا) طراحی صورت می گیرد. [۱۹]

محاسبه مدول الاستیسیته بتن طبق بند ۸.۵ آیین نامه ACI318:

$$w_c = 2500 \text{ kg/m}^3, f'_c = 240 \text{ kgf/cm}^2 = 23.54 \text{ Mpa}$$

$$E_c = 0.043(w_c)^{1.5} \sqrt{f'_c} = 26078 \text{ Mpa} = 265841 \text{ kgf/cm}^2$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.06E6}{265841} = 7.75$$

$$b_e = \min\{0.125L = 1.5, s/2 = 1.0\} = 1.5 \text{ m} \rightarrow$$

در رابطه فوق w_c جرم حجمی بتن و E_c مدول الاستیسیته بتن و f'_c مقاومت فشاری استوانه ای بتن می

باشد. و E_s مدول الاستیسیته فولاد می باشد.

در نتیجه کل عرض موثر است. L : طول پل و S : فواصل تیرها از هم می باشد.

$$I_{tr} = 128941 \text{ cm}^4; \bar{y} = 36.59 \text{ cm} \rightarrow S_t = 3524 \text{ cm}^3, S_c = 9911 \text{ cm}^3$$

در روابط فوق I_{tr} ممان اینرسی تبدیل یافته و $\bar{y}$ فاصله تارخشی تا بال پایین تیر آهن و S_c, S_t به ترتیب اساس مقطع در قسمت کششی و فشاری می باشد. محاسبات فوق الذکر پس از مدل سازی بانرم افزار SAP2000 بدست آمده که در فایل های ضمیمه ج وجود دارد.

برای پل عابر پیاده برای محل های باترافیک زیاد مثل فضای ارتباطی فروشگاهها بارزنده ۵۰۰ کیلوگرم نیرو بر متر مربع انتخاب می گردد. [۲۰]

$$DL = 0.13 * 2500 = 325 \text{ kgf} / \text{m}^2, SDL = 50 \text{ kgf} / \text{m}^2$$

$$\omega_t = (325 + 50 + 500) * 3 + 2 * 89.6 * 0.785 = 2766 \text{ kgf} / \text{m}$$

$$M_{\max} = \omega_t \times L^2 / 8 = 49788 \text{ kgf.m} \rightarrow$$

$$f_{bt} = \frac{M}{S_t} = 1413 \text{ kgf} / \text{cm}^2 < 1440 \rightarrow o.k. \rightarrow$$

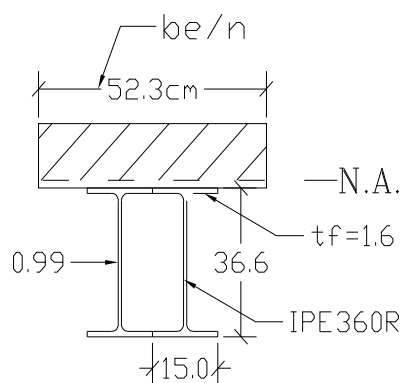
$$f_{bc} = \frac{M}{S_c} = 502 \text{ kgf} / \text{cm}^2 \rightarrow f_{bc|concrete} = \frac{502}{7.75} = 64.8 < 0.45 f'_c = 108 \rightarrow o.k.$$

کنترل خیز براساس مرجع [۱۹]:

$$\delta|_{D+L} = \frac{5 W_t L^4}{384 E_s I_{tr}} = 2.81 < l / 240 = 5 \text{ cm} \rightarrow \delta|_L = 1.52 < L / 360 = 3.33 \text{ cm}$$

۵-۱-۲ کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی

طبق ضوابط راهنمای طراحی AISC به کنترل ارتعاش می پردازیم.



شکل ۵-۳: مقطع تبدیل یافته به فولاد در کنترل ضوابط ارتعاش
در پل عابر پیاده

$$E_C = 1.35 E_C; n = \frac{E_s}{1.35 E_C} = \frac{2.06 E 6}{358872} = 5.74$$

$$\bar{y} = 37.93 \text{ cm}; I_{tr} = 137381 \text{ cm}^4$$

$$w_j = (325 + 50) \times 3 + 2 \times 89.6 \times 0.785 = 1266 \text{ kgf} / \text{m}$$

$$W_j = 1266 \times 12 = 15188 \text{ kgf}$$

از جدول ۱-۳ برای پل عابر پیاده نسبت میرایی $\beta = 0.01$ انتخاب می گردد.

۱-۲-۱-۵ تعیین فرکانس اساسی کف :

ابتدا خیز ماکزیمم بدون در نظر گرفتن بارزنده طبق ضابطه راهنمای طراحی برای پل عابر پیاده بدست

می آید و سپس طبق رابطه ۲-۳ فرکانس اساسی خواهد شد:

$$\delta|_{DL} = \frac{5 W_t L^4}{384 E_s I_{tr}} = 1.2 \text{ cm} \Rightarrow f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta}} = 0.18 \sqrt{\frac{981}{1.2}} = 5.13 \text{ HZ}$$

۲-۲-۱-۵ تعیین شتاب اوج

شتاب اوج طبق رابطه ۱-۳ برای فعالیت انسانی راه رفتن به شرح ذیل بدست خواهد آمد.

برای مود اول:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35f_n)}{\xi W} = \frac{(0.41 \times 1000 / 9.81) \exp(-0.35 \times 5.13)}{0.01 \times 15188} \times 100 = 4.57\% > \frac{a_0}{g} = 1.5\% \Rightarrow N.E.$$

برای مود دوم:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35f_n)}{\xi W} = \frac{(0.41 \times 1000 / 9.81) \exp(-0.35 \times 9.73)}{0.01 \times 15188} \times 100 = 0.91\% < \frac{a_0}{g} = 1.5\% \Rightarrow o.k.$$

لذا با مقایسه شتاب اوج با شتاب مطلوب طبق جدول ۳-۱ برای پلهای عابریاده در فضای داخلی نتیجه می گیریم که پل از نقطه نظراتعاش مطلوب نیست و می بایست درمود اول بهسازی گردد.

۳-۱-۵ طراحی پل با نرم افزار SAP2000 و تعیین پارامترهای مودال

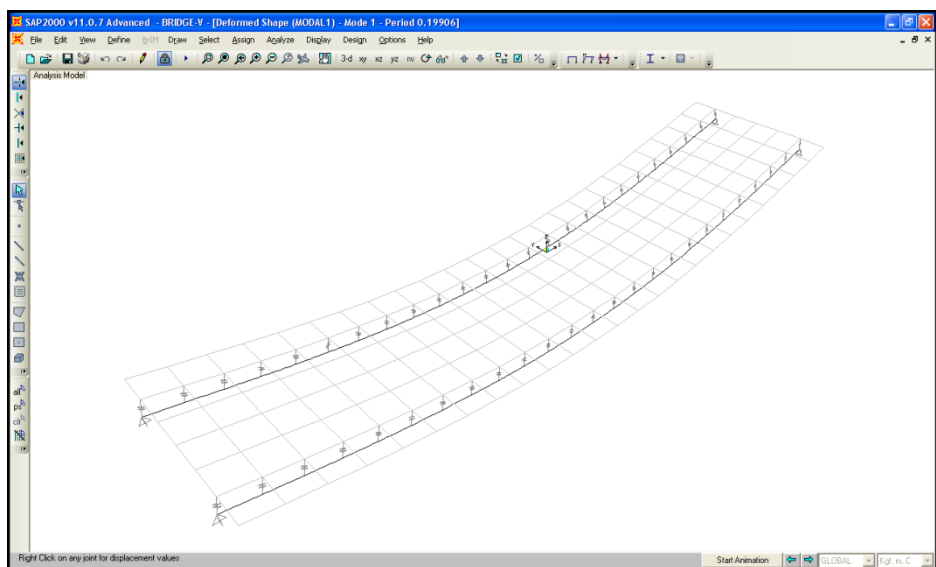
مدل اجزای محدود پل مذکور را مطابق روش شرح داده شده در فصل سوم ایجاد نموده و به بررسی نتایج با حل دستی می پردازیم.

$$\frac{f_b}{F_b} = 0.936 \rightarrow \frac{0.936 - 0.98}{0.98} = -4.5\%$$

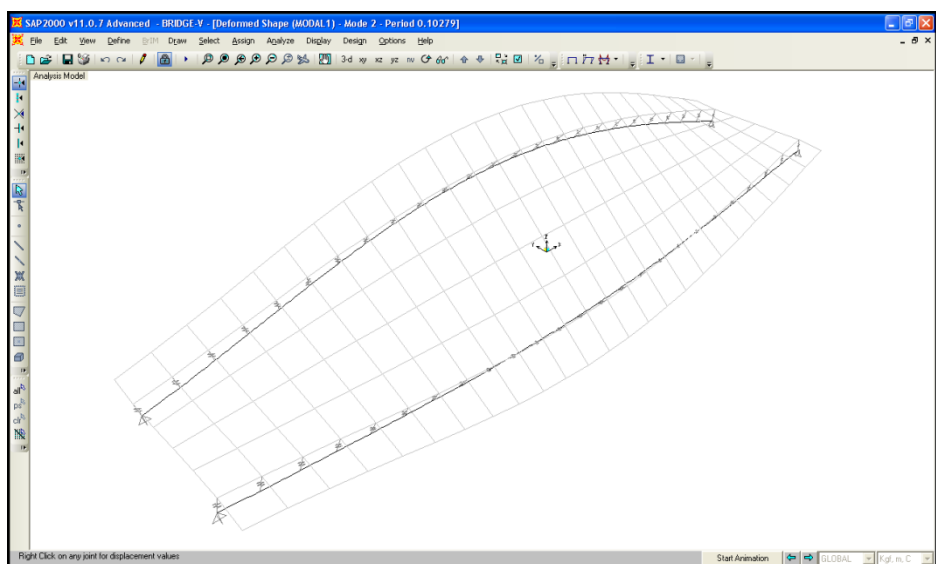
$$\delta|_{D+L} = 2.89 \text{ cm} \rightarrow \frac{2.89 - 2.81}{2.81} = +2.85\%$$

مشاهده می گردد که مدلسازی از دقت خوبی برخوردار است.

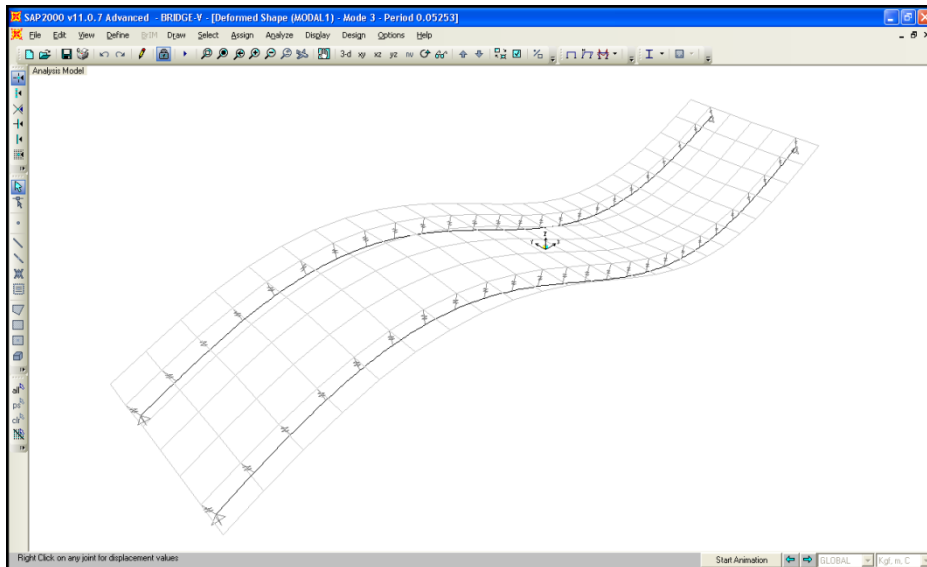
با لحاظ کردن افزایش ۳۵ درصدی در مدول الاستیسیته بتن به علت رفتار دینامیکی بتن طبق ضابطه راهنمای طراحی در تحلیل مودال، اشکال مودی پل مذکور بدست می آید (اشکال ۵-۴ تا ۵-۶).



شکل ۴-۵: مود اول پل عابرپیاده با فرکانس طبیعی ۵/۲ هرتز



شکل ۵-۵: مود دوم پل عابرپیاده با فرکانس طبیعی ۹/۷۳ هرتز



شکل ۵-۶: مود سوم پل عابرپاده با فرکانس طبیعی ۱۹/۰۴ هرتز

اختلاف فرکانس طبیعی اساسی محاسبه شده به روش حل دستی طبق معیار راهنمای طراحی و بدست آمده به روش اجزای محدود با نرم افزار SAP2000 خواهد شد:

$$\frac{5.02 - 5.13}{5.13} \times 100 = -2.144\%$$

نتیجه اینکه در این در روش اختلاف در محاسبه فرکانسها ناچیز است.

تعیین پارامترهای مودال:

از آنجاییکه اختلاف فرکانس در روش دستی و نرم افزار ناچیز است نتیجه گرفته می شود که مدلسازی از دقت قابل قبولی برخوردار است لذا پس از آنالیز مودال خواهیم داشت.

$$\tilde{m}_1 = 1.0, \Phi_1 = -0.035817m \Rightarrow \tilde{m}_{1e} = \frac{\tilde{m}_1}{\Phi_1^2} = \frac{1}{(-0.035817)^2} = 780 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

۴-۱-۵ تعیین باردینامیکی معادل راهنمای طراحی

طبق بررسیهای بعمل آمده دراین تحقیق وصحت این ادعادر مرجع [۲] شتاب بدست آمده ازتحلیل اجزای محدود با شتاب محاسبه شده بروش راهنمای طراحی اختلاف فاحشی دارد. برای هماهنگی ، شتاب اوج بدست آمده ازآنالیزتاریخچه زمانی را با شتاب اوج راهنمای طراحی شبیه سازی کرده ومقیاس مربوطه بدست می آید. درحالت رزونانس باردینامیکی طبق رابطه ۳-۱۹ به شرح ذیل می باشد.

$$p(t) = [p_0 \exp(-0.35f_n)] \sin(2\pi f_n t) \Rightarrow$$

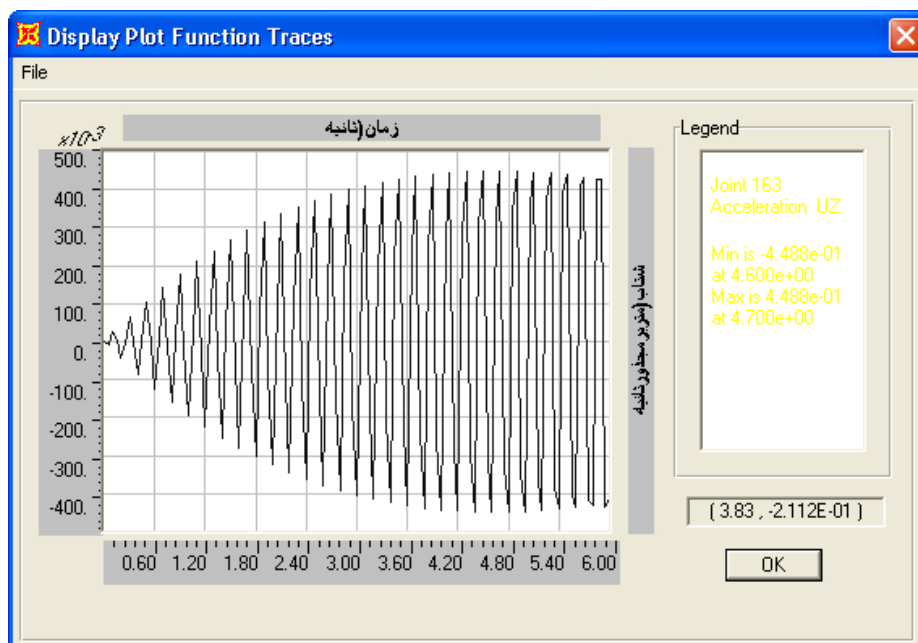
$$p(t) = \left[\frac{0.41 \times 100}{9.81} \exp(-0.35 \times 5.02) \right] \sin(2\pi \times 5.02) = [7.212 \sin(31.54t)] \text{ kgf}$$

پس ازاعمال باردینامیکی دروسط پل بصورت باری متمرکزوهارمونیک وانجام تحلیل دینامیکی، شتاب اوج دراین نقطه عبارت است:

$$\frac{a}{g} \Big|_{\max} = \frac{2.859E-1}{9.81} \times 100 = 2.91\%$$

$$SCALE = \frac{4.57}{2.91} = 1.57$$

پس ازاعمال مقیاس ۱/۵۷ دربارگذاری دینامیکی پاسخ شتاب درگره ۱۶۳ (وسط پل) درمدل رایانه ای مطابق روش حل دستی شبیه سازی می شود(شکل ۵-۷).



شکل ۵-۷: نمودار پاسخ شتاب - زمان برای بار دینامیکی شبیه سازی شده

برای فعالیت راه رفتن در پل عابر پیاده قبل از نصب TMD

۵-۱-۵ افزایش سختی برای ارضای ضوابط ارتعاش مطلوب

از آنجا که روش اجزای محدود سازگاری خوبی با تحلیل دستی داشت. لذا در این مرحله با افزایش سختی (افزایش مقاطع طراحی) شتاب اوج را کاهش داده تا حداکثر شتاب نسبی به حد ۱/۵٪ طبق جدول ۳-۱ محدود گردد.

با افزایش IPE360R به IPE500 پس از آنالیز مودال فرکانس مود اول ۸/۲۴ هرتز بدست می آید. در نتیجه شتاب اوج به روش راهنمای طراحی خواهد بود:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35 f_n)}{\xi W} = \frac{(0.41 \times 1000 / 9.81) \exp(-0.35 \times 8.24)}{0.01 \times 15188} \times 100 = 1.53\% \cong \frac{a_0}{g} = 1.5\% \Rightarrow o.k.$$

برای مدل رایانه ای طبق رابطه ۳-۱۹ بارگذاری دینامیکی خواهد بود:

$$p(t) = [p_0 \exp(-0.35 f_n t)] \sin(2\pi f_n t) \Rightarrow$$

$$p(t) = \left[\frac{0.41 \times 100}{9.81} \exp(-0.35 \times 8.24) \right] \sin(2\pi \times 8.24) = [2.337 \sin(51.77t)] \text{kgf}$$

با این باردینامیکی شتاب اوج دروسط پل خواهد بود:

$$\frac{a}{g} \Big|_{\max.} = \frac{0.0569}{9.81} \times 100 = 0.58\%$$

$$SCALE = \frac{1.53}{0.58} = 2.638 \xrightarrow{\text{Analyse THA}} \frac{a}{g} \Big|_{\max.} = 1.53\%$$

دراین حالت می بایست مقیاس بارگذاری ۲/۶۳۸ به باردینامیکی اعمال شود تا نتایج با روش دستی طبق راهنمای طراحی یکسان گردد.

۵-۱-۶ ارتعاش مطلوب با نصب TMD

ازبند ۵-۱-۲ این نتیجه بدست آمد که قبل از نصب TMD حداکثر شتاب نسبی (درصد نسبت به شتاب جاذبه) با باردینامیکی شبیه سازی شده دروسط پل (محل بحرانی) ۴/۵۷٪ می باشد. از طرفی طبق جدول ۳-۱ برای پل عابر پیاده مقدار میرایی نسبی ۱٪ می باشد. ($\xi = \beta = 1\%$)

قبل از تعیین پارامترهای بهینه TMD، در مدل سازی با نرم افزار مقدار میرایی سیستم کف افزایش داده می شود تا شتاب نسبی کف به حد مجاز ۱/۵٪ برسد. پس از چند مرحله سعی و خطا و تحلیل دینامیکی این نتیجه بدست آمده که با اتخاذ $\xi = 4/5\%$ شتاب نسبی به حد مطلوب یعنی ۱/۵٪ کاهش یافته است. هدف این است که از نمودار ۴-۹ با مقدار میرایی نسبی بدست آمده، درصد جرم نسبی معادل TMD، قبل از طراحی تخمین زده شود. ادامه محاسبات به شرح زیر صورت می گیرد:

$$\{\xi = 0.01, \xi_e = 0.045\} \xrightarrow{\text{figure(4-9)}} \bar{m} = 0.011 \Rightarrow use \dots \bar{m} = 0.01$$

$$\{\bar{m} = 0.01, \xi = 0.01\} \xrightarrow{\text{figure(4-7)}} f_{opt.} = 0.985$$

$$\{\bar{m} = 0.01, \xi = 0.01\} \xrightarrow{\text{figure(4-8)}} \xi_d|_{opt.} = 0.063$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 5.02 = 31.54 \text{ rad/s} \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 31.07 \text{ rad/s}$$

$$m_d = \bar{m} \times \tilde{m}_{1e} = 0.01 \times 780 \rightarrow m_d = 7.8 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 31.07^2 \times 7.8 = 7530 \text{ kgf/m}$$

$$c_d = 2\xi_d|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.063 \times 31.07 \times 7.8 \rightarrow c_d = 30.54 \text{ kgf} \cdot \text{sec./m}$$

$$\bar{m} = 0.01 \rightarrow \{k_d = 7530 \text{ kgf/m}, c_d = 30.54 \text{ kgf} \cdot \text{sec./m}, m_d = 7.8 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m, \xi = 0.01\}$$

پس از اعمال پارامترهای بهینه درمدلسازی TMD و تحلیل دینامیکی ، مقادیر تغییر مکان نسبی کف

و شتاب اوج کف خواهد شد :

$$\bar{u}_d = (1.283e-4 - 3.491e-5) \rightarrow \bar{u}_d = 0.093 \text{ mm}, \left. \frac{a}{g} \right|_{\max.} = \frac{2.555E-2}{9.81} \times 100 = 0.26\%$$

در رابطه فوق $\bar{u}_d$ تغییر مکان حداکثری کف نسبت به TMD می باشد.

یعنی بانصب یک درصد جرم مودال، کاهش شتاب اوج خواهد بود:

$$\frac{0.26 - 4.57}{4.57} \times 100 = -94.3\%$$

در شکل ۵-۱۰ مقایسه حالت قبل و بعد از نصب TMD نشان داده شده است.

حال حالت دیگری را بررسی کرده :

$$\{\bar{m} = 0.02, \xi = 0.01\} \xrightarrow{\text{figure(4-7)}} f_{opt.} = 0.975$$

$$\{\bar{m} = 0.02, \xi = 0.01\} \xrightarrow{\text{figure(4-8)}} \xi_d \Big|_{opt.} = 0.09$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 5.02 = 30.75 \text{ rad/s} \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 30.75 \text{ rad/s}$$

$$m_d = \bar{m} \times \tilde{m}_{1e} = 0.02 \times 780 \rightarrow m_d = 15.6 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 30.75^2 \times 15.6 = 14751 \text{ kgf/m}$$

$$c_d = 2\xi_d \Big|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.09 \times 30.75 \times 15.6 \rightarrow c_d = 86.35 \text{ kgf} \cdot \text{sec.} / \text{m}$$

$$\bar{m} = 0.02 \rightarrow \{k_d = 14751 \text{ kgf/m}, c_d = 86.35 \text{ kgf} \cdot \text{sec.} / \text{m}, m_d = 15.6 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}, \xi = 0.01\}$$

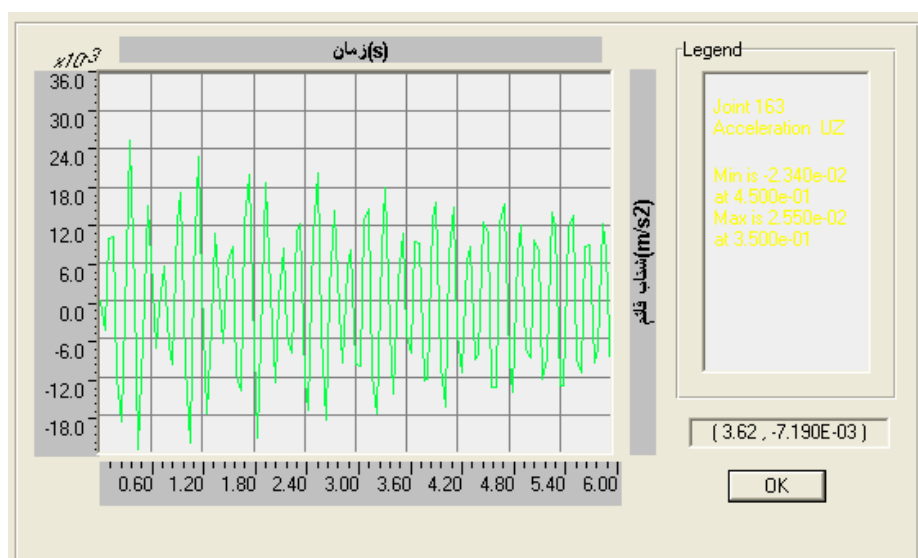
پس از تحلیل داریم:

$$\bar{u}_d = (1.009E^{-4} - 3.369E^{-5}) \rightarrow \bar{u}_d = 0.06721 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{g} \Big|_{\max.} = \frac{2.458E^{-2}}{9.81} \times 100 = 0.25\%$$

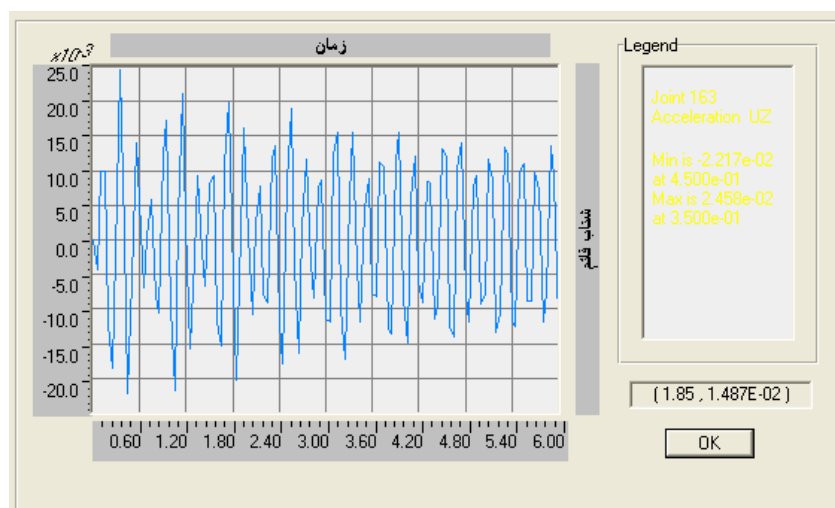
در این حالت با افزایش ۱٪ در جرم TMD اختلاف زیادی در پاسخ شتاب کف دیده نشد لذا انتخاب اولیه

نسبت جرم ۱٪ جهت کاهش شتاب مناسب می باشد.



شکل ۵-۸: نمودار شتاب-زمان پل عابر پیاده پس از نصب TMD سازگار با موداول با

$$\bar{m} = 0.01 = 1\%$$



شکل ۵-۹: نمودار شتاب-زمان پل عابر پیاده پس از نصب TMD سازگار با موداول با

$$\bar{m} = 0.02 = 2\%$$

۷-۱-۵ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD

در صورتیکه پل عابر پیاده در مرحله طراحی باشد. اختلاف وزن ناشی از تقویت سازه ای برای ارضای معیارهای ارتعاش مطلوب خواهد بود. قبل از افزایش سختی مقطع تیر طبق بند ۵-۱-۱ IPE360R می باشد که پس از افزایش سختی طبق بند ۵-۱-۵ IPE500 بدست آمده لذا این اختلاف وزن خواهد بود:

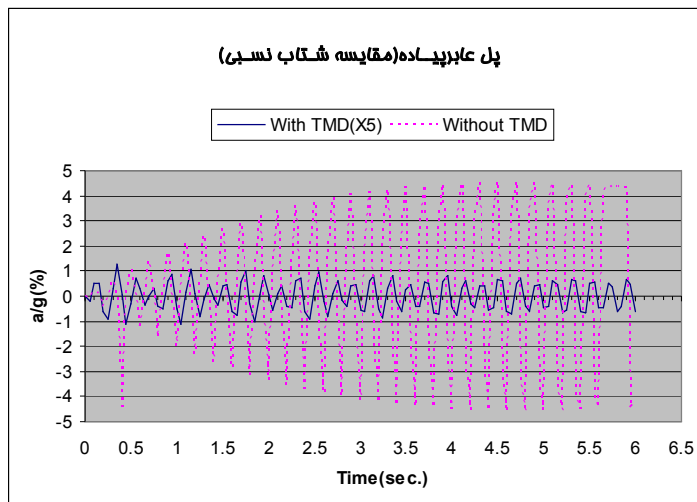
$$\Delta W = \Delta A \times \gamma_s \times L = (116 - 89.6) \times 7850 \times 12 \times 2 = 4974 kg$$

اگر در حال حاضر برای تهیه و ساخت تیر ورق پل عابر پیاده هر کیلوگرم ۱۵۰۰۰ ریال هزینه شود آنگاه هزینه ریالی برای افزایش وزن خواهد بود:

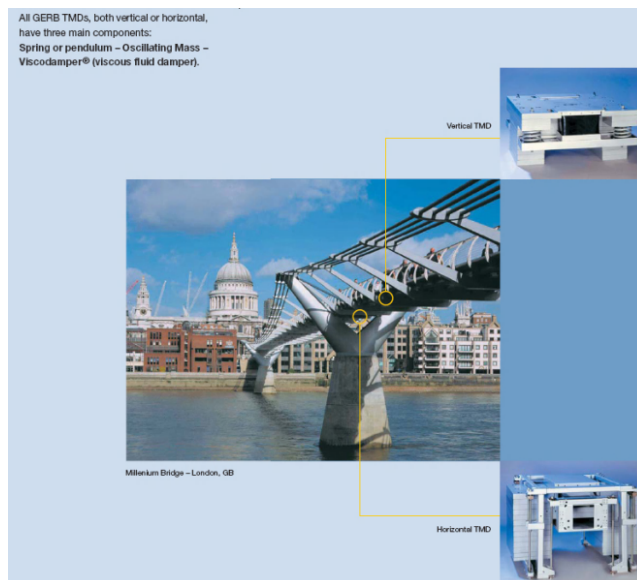
$$cost = 4974 \times 15000 = 74'610'000 Rials$$

در صورت استفاده از سیستم TMD طبق بند ۵-۱-۶ متشکل از فنر-جرم-میراگر (اصطلاحاً کمک فنر) هزینه مذکور نباید از ۱۰'۰۰۰'۰۰۰ ریال بیشتر باشد (بر اساس قیمت فنر و کمک فنر و سائت نقلیه) و با این فرض حدود ۸۶/۵٪ از هزینه ها کاسته خواهد شد.

البته اگر سازه مذکور قبلاً اجرا شده باشد و هدف بهسازی پل مذکور باشد آنگاه به مراتب تقویت سازه ای هزینه بیشتری خواهد داشت و بعضاً ممکن است تقویت سازه ای از نقطه نظر اجرایی و معماری غیر ممکن باشد که در این صورت استفاده از سیستم TMD یا روشهای دیگر اجباری است؛ به عنوان مثال پل هزاره اول لندن که پس از سه روز از زمان بازگشایی به علت لرزش بیش از حد در راستای جانبی و ثقلی بهره برداری از آن متوقف شد و پس از مطالعات و اندازه گیریهای محلی و صرف وقت زیاد بانصب TMD تقویت گردید. [۹]



شکل ۵-۱۰: مقایسه نمودار شتاب - زمان قبل و بعد از نصب TMD در نمونه پل عابرپیاده
با $\bar{m} = 0.01$



شکل ۵-۱۱: نصب TMD برای ممانعت از لرزش جانبی و عمودی در پل هزاره
اول لندن [۹]

۵-۱-۸ نصب چندین TMD معادل با یک TMD

با استفاده از تکنیک صورت گرفته در مرجع [۲۱] از ۳ دستگاه TMD معادل یک TMD استفاده کرده

در این صورت :

نسبت جرم موثر معادل یک درجه آزادی می تواند از حاصل ضرب جرم هر TMD در مربع دامنه مودال

در آن مکان محاسبه شود به عبارت دیگر:

$$\bar{m}_{1e} = m_{d1} \times (\Phi_{11}^2 + \Phi_{12}^2 + \Phi_{13}^2)$$

فرض کنید معادل یک TMD سه دستگاه TMD در گره های ۱۳۳ و ۱۶۳ و ۱۹۴ که فواصل هریک از گره

های ۱۳۳ و ۱۹۴ از گره وسط ۳ متری باشد، نصب کنیم. از نتایج آنالیز مودال برای مود اول داریم:

$$\varphi_{1(163)} = -0.03582 \text{ و } \varphi_{1(194)} = \varphi_{1(133)} = -0.02536$$

$$\begin{aligned} \text{if } \bar{m}_1 = 0.01 &\Rightarrow 0.01 = m_d \times (\varphi_{1(163)}^2 + 2 \times \varphi_{1(133)}^2) : \\ \Rightarrow m_d &= \frac{0.01}{0.03582^2 + 0.02536^2 \times 2} \Rightarrow m_d = 3.89 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m \end{aligned}$$

از نتایج بند ۵-۱-۶ استفاده کرده و در نتیجه خواهیم داشت:

$$c_d = 2\xi_d m_d \omega_d = 2 \times 0.063 \times 3.89 \times 31.07 \rightarrow c_d = 15.22 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / m$$

$$k_d = \omega_d^2 \times m_d = 31.07^2 \times 3.89 = 3755 \text{ kgf} / m$$

پس از نصب سه دستگاه TMD (معادل یک دستگاه TMD در وسط گره ۱۶۳) با مشخصات هر TMD به

شرح فوق الذکر، پس از آنالیز دینامیکی با بارگذاری مورد استفاده در بند ۵-۱-۴ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \bar{u}_d|_{163} &= (0.128 - 0.03491) = 0.093 \text{ mm} \rightarrow \frac{a}{g}|_{\max} = \frac{2.55E-2}{9.81} \times 100 = 0.26\% \Rightarrow O.K. \\ \bar{u}_d|_{133,194} &= (0.0969 - 0.02518) = 0.071 \text{ mm} \rightarrow \frac{a}{g}|_{\max} = \frac{1.776E-2}{9.81} \times 100 = 0.181\% \end{aligned}$$

در نتیجه مشاهده می شود که در استفاده از سه دستگاه TMD نتایج مشابه استفاده از یک دستگاه TMD می باشد..

هدف از کاربرد این روش این است که بتوان با استفاده از چند TMD، مشخصات فنی یک دستگاه TMD کاهش داده شود . همچنانکه در کاربری سالن ورزش کشتی خواهیم دید استفاده از یک TMD نیاز به مقادیر زیاد جرم-سختی-میرایی دارد.

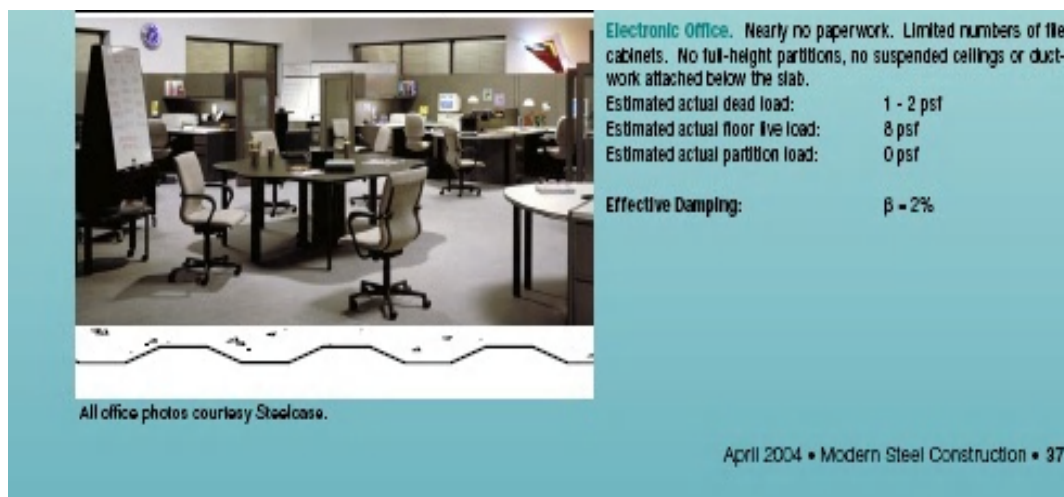
۵-۲ کاربرد TMD در اداره الکترونیکی

تعریف مشخصات کف:

کاربری کف جهت ساختمان اداره از نوع الکترونیکی می باشد یعنی اداره ای که فاقد پارتیشن و فایل

باشد در این صورت نسبت میرایی موجود در آن ۲٪ تخمین زده می شود (شکل ۵-۱۲).

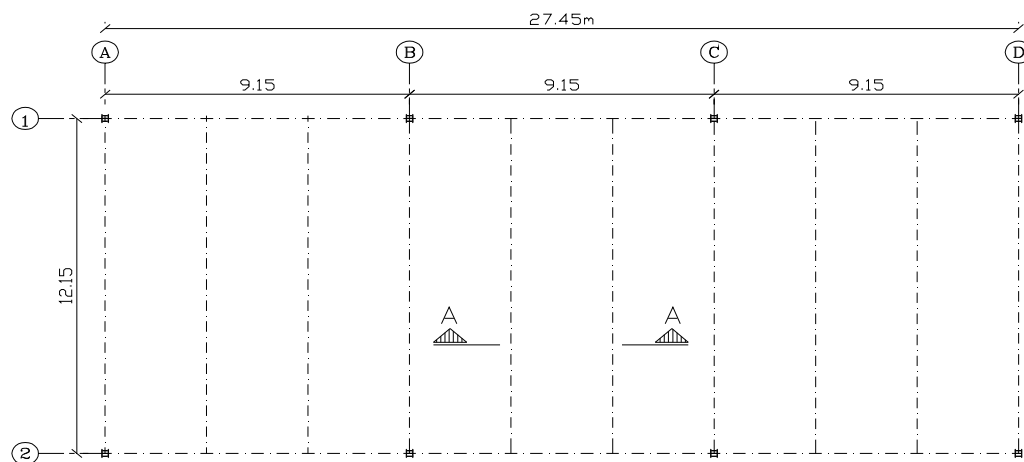
پلان تیرریزی و مقطع عرضی آن در شکل‌های ۵-۱۳ و ۵-۱۴ نشان داده می شود.



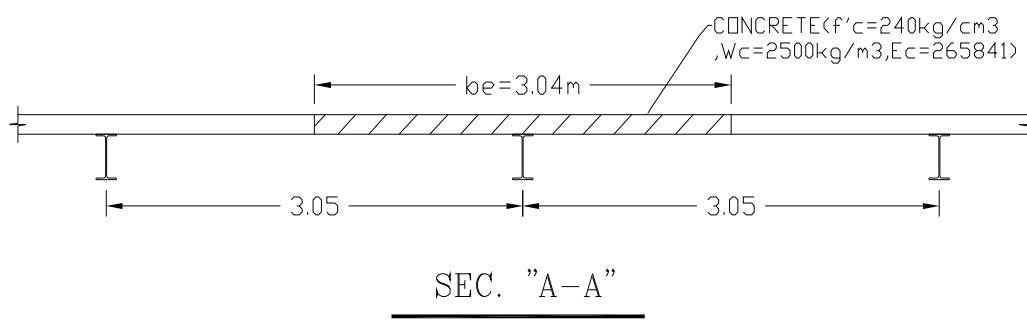
شکل ۵-۱۲: نمونه کف اداری الکترونیکی امروزی دارای مشخصات ذیل:

تقریباً بدون کاربرد کاغذ در کارها، محدودیت در قفسه های بایگانی و کتاب

بدون پارتیشن های کامل از کف تا سقف ، بعضاً فاقد سقف کاذب در طبقه همکف (بعلت وجود پارکینگ) [۲۲]



شکل ۵-۱۳: نمونه پلان تیرریزی کف ساختمان اداری امروزی با فضاهای باز و فواصل زیاد ستونها
از هم در مقایسه با ساختمانهای سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ میلادی [۲۲]



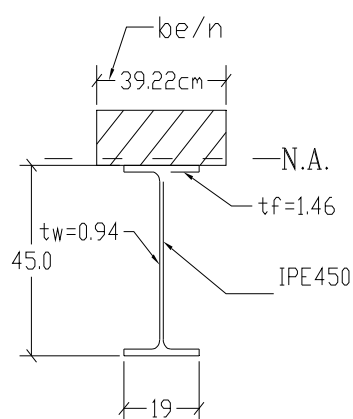
شکل ۵-۱۴: مقطع عرضی کف ساختمان اداره الکترونیکی (شکل ۵-۱۳)

۵-۲-۱ طراحی براساس ارضای معیار مقاومت و خیز

براساس روش تنش مجاز طبق ضوابط آفا [۱۹]

۵-۲-۱-۱ کنترل معیار مقاومت

تیر فرعی:



شکل ۵-۱۵: مقطع عرضی تبدیل یافته فولاد مربوط به تیر فرعی کف اداره الکترونیکی
در معیار مقاومت

$$L_J = 12.15m$$

$$b_e = \min(0.25L_J, S = 3.05) = 3.04m$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.06E6}{265841} = 7.75$$

$$\bar{y} = 46.8cm, I_{tr} = 110523cm^4$$

$$S_t = \frac{I_{tr}}{C_t} = 2362cm^3; S_C = 9868cm^3$$

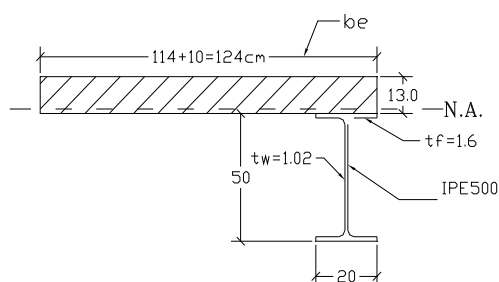
$$w_J = (0.13 \times 2500 + 20 + 250) \times 3.05 = 1815kgf / m$$

$$M_j|_{\max.} = \frac{w_j \times L^2}{8} = \frac{1815 \times 12.15^2}{8} = 33492 \text{ kgf.m}$$

$$\rightarrow f_b = \frac{3349200}{2362} = 1420 \Rightarrow \frac{f_b}{F_b} = \frac{1420}{1440} = 0.986$$

$$f_c = \frac{3349200}{9868} = 339 \Rightarrow f_c|_{\text{concrete}} = \frac{f_c}{n} = \frac{339}{7.75} = 43.7 < 0.45 f'_c = 108 \Rightarrow o.k.$$

تیر اصلی:



شکل ۵-۱۶: مقطع کامپوزیت تیر اصلی کناری در کاربری اداری با عرض موثر دال بتنی

$$L_g = 9.15 \text{ m}$$

$$b_e = \min(0.125 L_g = 1.14, L_g / 2 = 6.075) = 1.14 \text{ m}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.06 E 6}{265841} = 7.75$$

$$\bar{y} = 45.22 \text{ cm}, I_{tr.} = 125021 \text{ cm}^4$$

$$S_t = \frac{I_{tr.}}{C_t} = 2765 \text{ cm}^3; S_c = 9783 \text{ cm}^3$$

$$w_g = (0.13 \times 2500 + 20 + 250) \times 12.15 / 2 = 3614 \text{ kgf / m}$$

$$M_g|_{\max.} = \frac{w_g \times L^2}{8} = \frac{3614 \times 9.15^2}{8} = 37828 \text{ kgf.m}$$

$$\rightarrow f_b = \frac{3782800}{2765} = 13680 \Rightarrow \frac{f_b}{F_b} = \frac{1368}{1440} = 0.95$$

$$f_c = \frac{3782800}{9783} = 387 \Rightarrow f_c|_{\text{concrete}} = \frac{f_c}{n} = \frac{387}{7.75} = 49.9 < 0.45 f'_c = 108 \Rightarrow o.k.$$

۵-۲-۱-۲ کنترل خیز طبق ضوابط آفا

تیرفرعی:

طبق بند الف از ردیف ۱۰-۱-۹-۳ آفا [۱۹]:

$$\delta|_{D+L} = \frac{5 W_j L^4}{384 E_S I_{tr}} = 2.26 < l / 240 = 5.06 \text{ cm} \rightarrow \delta|_L = 0.95 < L / 360 = 3.38 \text{ cm}$$

از طرفی طبق بند ب از ردیف ۱۰-۱-۹-۳ آفا تقریباً ضابطه کنترل ارتعاشی برقرار است.

$$\frac{d}{l} = \frac{45+13}{1215} = 0.048 \cong \frac{1}{20} = 0.05$$

اما طبق بررسیهای بعمل آمده در بند بعدی (طبق ضوابط راهنمای طراحی) می بایست برای ارتعاش مطلوب، کف بهسازی گردد. لازم بذکر است آفا در خصوص ارتعاش ذکر می کند که به مراجع معتبر مراجعه شود و ارائه چنین ضوابطی ارائه رعایت حداقل ضوابط است.

تیر اصلی:

$$\delta|_{D+L} = \frac{5 W_g L^4}{384 E_S I_{tr}} = 1.28 < l / 240 = 3.81 \text{ cm} \rightarrow \delta|_L = 0.54 < L / 360 = 2.54 \text{ cm}$$

از طرفی طبق بند ب از ردیف ۱۰-۱-۹-۳ آفا ضابطه کنترل ارتعاشی برقرار است.

$$\frac{d}{l} = \frac{50+13}{915} = 0.069 > \frac{1}{20} = 0.05$$

۵-۲-۲ کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی

طبق ضوابط راهنمای طراحی آیین نامه AISC

۵-۲-۲-۱ تیرفرعی (محاسبه مشخصات هندسی ارتعاش)

$$n = \frac{E_s}{1.35E_c} = 5.74 \Rightarrow b_e / n = \frac{304}{5.74} = 52.96 \text{ cm}$$

$$I_j = I_{tr.} = 116099 \text{ cm}^4$$

$$B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{1/4} L_j < \frac{2}{3} \text{ width}$$

$$D_s = \frac{d_e^3}{12n} = 31.90; D_j = \frac{I_j}{S} = 380.65; C_j = 2.0 \text{ ل}$$

$$B_j = 1307 \text{ cm} < \frac{2}{3} \times 3 \times 9.15 = 18.30 \text{ m}$$

$$\Rightarrow B_j = 13.07 \text{ m}$$

۵-۲-۲-۲ تیراصلی (محاسبه مشخصات هندسی ارتعاش)

$$b_e = \min\{0.2L_g + 0.1, L_j / 2\} = \min\{1.93 \text{ m}, 6.075\} = 193 \text{ cm}$$

$$n = \frac{E_s}{1.35E_c} = 5.74 \Rightarrow b_e / n = \frac{193}{5.74} = 33.62 \text{ cm}$$

$$I_g = I_{tr.} = 145315 \text{ cm}^4$$

$$B_g = C_g \left(\frac{D_s}{D_g} \right)^{1/4} L_j < \frac{2}{3} \text{ length}$$

$$D_s = \frac{d_e^3}{12n} = 31.90; D_g = \frac{2I_g}{L_j} = 239.2; C_g = 1.8 \rightarrow B_g = 996 \text{ cm} < \frac{2}{3} \times 1215 = 810 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow B_g = 8.10 \text{ m}$$

$$\text{if } L_g = 9.15 < B_j = 13.07 \text{ m} \rightarrow 0.5 < \frac{L_g}{B_j} = \frac{9.15}{13.07} = 0.7 < 1 \Rightarrow \Delta'_g = 0.7 \Delta_g$$

۳-۲-۲-۵ محاسبه فرکانس اساسی در کف اداره الکترونیکی

$$w_j = (325 + 40 + 20) \times 3.05 + 98.8 \times 0.785 = 1252 \text{ kgf} / m$$

$$\Delta_j = \frac{5w_j L^4}{384E_s I_j} = 1.49 \text{ cm}$$

$$w_g = (325 + 40 + 20) \times 12.15 / 2 + 116 \times 0.785 = 2430 \text{ kgf} / m$$

$$\Delta_g = \frac{5w_g L^4}{384E_s I_g} = 0.74 \text{ cm} \rightarrow \Delta'_g = 0.7\Delta_g = 0.7 \times 0.74 = 0.518 \text{ cm}$$

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta'_g}} = 3.98 \text{ Hz}$$

۴-۲-۲-۵ محاسبه شتاب اوج در کف اداره الکترونیکی

توضیح اینکه کفه^۱ مورد مطالعه بین محوره‌های B و C از شکل ۵-۱۳ می باشد.

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta'_g} W_j + \frac{\Delta'_g}{\Delta_j + \Delta'_g} W_g$$

$$W_j = (wBL)_j = \left(\frac{1252}{3.05}\right) \times 13.07 \times 12.15 = 65186 \text{ kgf}$$

$$W_g = (wBL)_g = \left(\frac{2430}{\frac{12.15}{2}}\right) \times 8.10 \times 9.15 = 29646 \text{ kgf}$$

$$\Rightarrow W = \frac{1.49}{1.49 + 0.518} \times 65186 + \frac{0.518}{1.49 + 0.518} \times 29646 = 56018 \text{ kg}$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35f_n)}{\xi W} = \frac{(0.29 \times 1000 / 9.81) \exp(-0.35 \times 3.98)}{0.02 \times 56018} \times 100 = 0.66\% > \frac{a_0}{g} = 0.5\% \Rightarrow N.E.$$

^۱ قسمتی از کف که بین چهارستون محصور شده است.

نتیجه اینکه شتاب اوج کف اداری مذکور از حد مطلوب بالاتر است و می بایست بهسازی گردد.

۳-۲-۵ طراحی کف اداری بانرم افزار SAP2000

در روش اجزای محدود و حل دستی ، مقایسه تنشهای خمشی و خیز به شرح ذیل صورت می گیرد.

۱-۳-۲-۵ تیرفرعی

$$\frac{f_b}{F_b} = 0.853 \rightarrow \frac{0.853 - 0.98}{0.98} = -12.9\%$$

$$\delta|_{D+L} = 3.2cm \rightarrow \frac{3.2 - 2.26}{2.26} = +41.6\%$$

۲-۳-۲-۵ تیر اصلی

$$\frac{f_b}{F_b} = 0.852 \rightarrow \frac{0.852 - 0.95}{0.95} = -10.3\%$$

$$\delta|_{D+L} = 1.13cm \rightarrow \frac{1.13 - 1.28}{1.28} = -11.7\%$$

بین دوروش اختلاف کمی در تنشهای خمشی و اختلاف محسوسی در خیز کف کامپوزیت وجود دارد

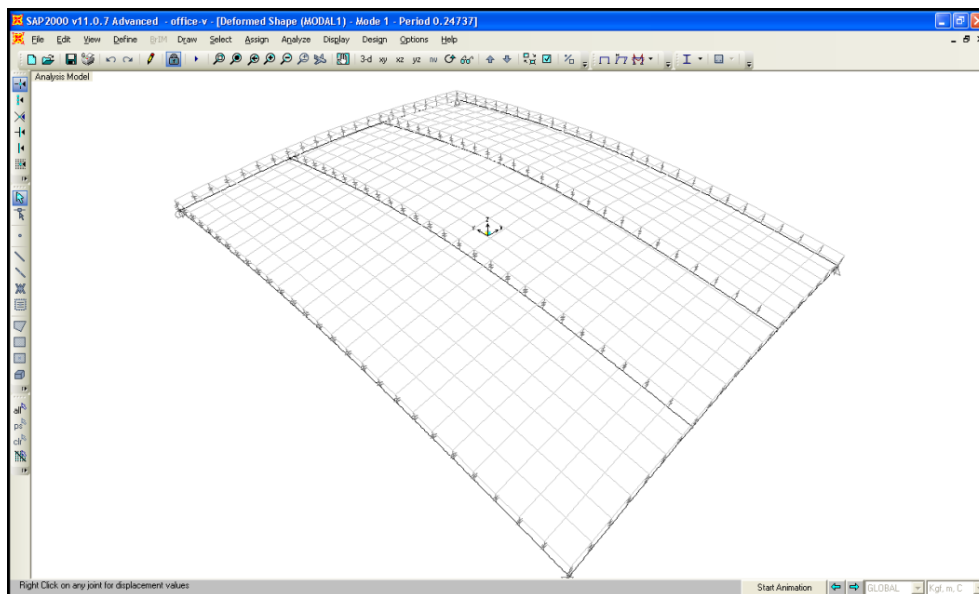
که علت اصلی اختلاف در فرض عرض موثر می باشد و در این خصوص مطالعاتی در این مرجع صورت

گرفته است. [۲۳]

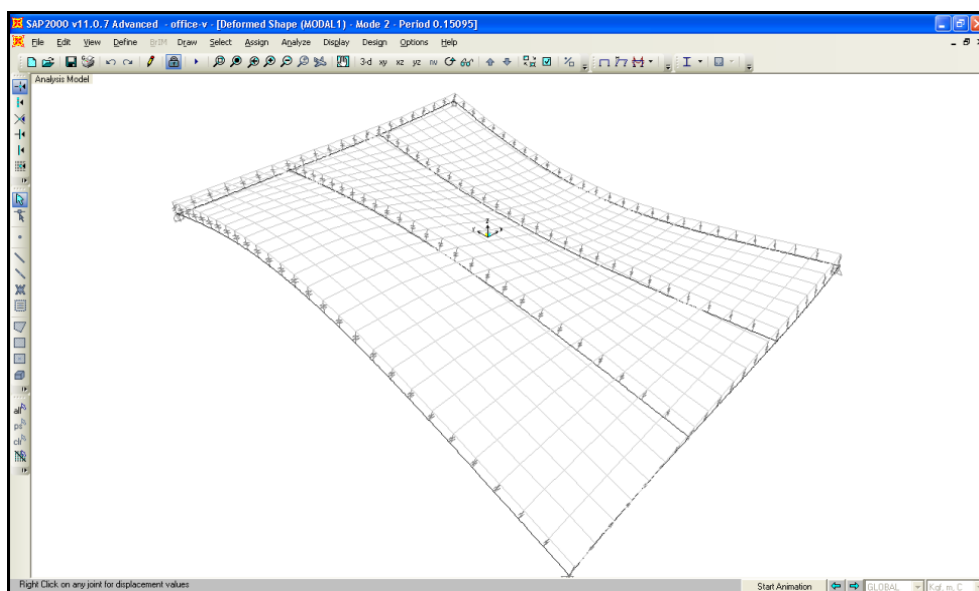
۳-۳-۲-۵ تعیین مود های ارتعاش و فرکانس اساسی کف

با لحاظ کردن افزایش ۳۵٪ مدول الاستیسیته بتن پس از آنالیز مودال شکلهای مودی بدست می

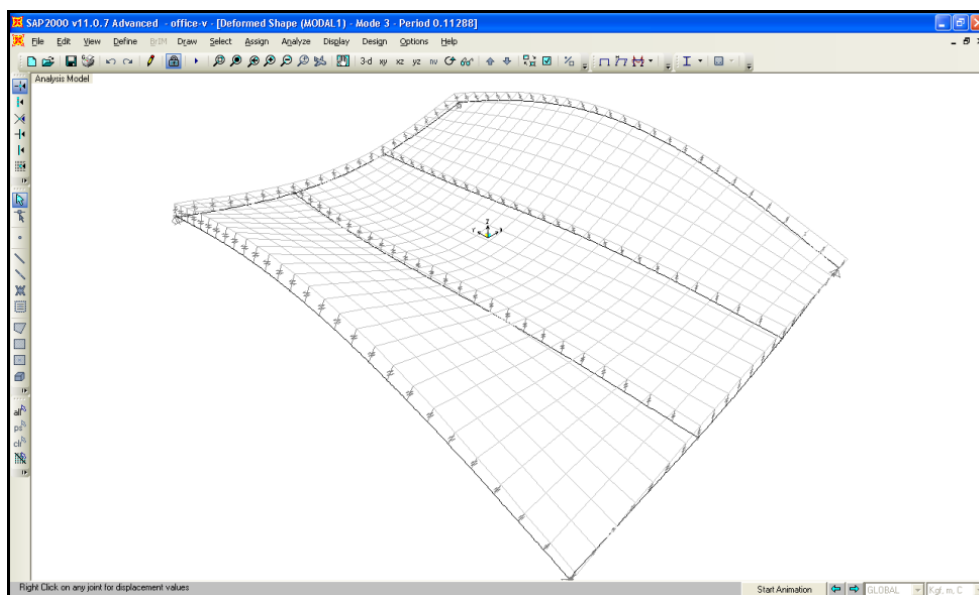
آیند (اشکال ۵-۱۷ تا ۵-۱۹).



شکل ۵-۱۷: شکل مود اول ارتعاش کف اداری با فرکانس ۴/۰۴ هرتز



شکل ۵-۱۸: شکل مود دوم ارتعاش کف اداری با فرکانس ۶/۶۳ هرتز



شکل ۵-۱۹: شکل مود سوم ارتعاش کف اداری با فرکانس ۸/۸۶ هرتز

اختلاف فرکانس اساسی با روش اجزای محدود:

$$Df_n = \frac{4.04 - 3.98}{3.98} \times 100 = +1.5\%$$

نتیجه اینکه اختلاف فرکانس اساسی محاسبه شده بروش راهنمای طراحی انطباق خوبی با مدل اجزای محدود دارد.

۴-۲-۵ تعیین باردینامیکی معادل راهنمای طراحی

در این قسمت به تعیین بارهای دینامیکی معادل آیین نامه پرداخته می شود.

۱-۴-۲-۵ درمود اول

از ضمیمه الف باردینامیکی معادل راهنمای طراحی به شرح زیر بدست می آید و محل این باردینامیکی در مرکز کف (بحرانی ترین قسمت) می باشد و خواهیم داشت.

$$p(t) = [p_0 \exp(-0.35 f_n)] \sin(2\pi f_n t) \Rightarrow$$

$$p(t) = \left[\frac{0.29 \times 1000}{9.81} \exp(-0.35 \times 4.04) \right] \sin(2\pi \times 4.04 t) = [7.2 \sin(25.38 t)] \text{ kgf}$$

پس از تحلیل تاریخچه زمانی در مرکز کف، شتاب اوج خواهد شد:

$$\frac{a}{g} \Big|_{\max} = \frac{-8.181E-2}{9.81} \times 100 = 0.9\% \rightarrow scale = \left(\frac{0.66}{0.9} \right) = 0.733$$

علت اعمال مقیاس در نیروی دینامیکی این است که در ضوابط راهنمای طراحی دهانه های متوالی تاثیر در مقدار شتاب دارند و از طرفی در این ضوابط، تاثیر مقادیر میرایی با اندازه گیریهای محلی گنجانده شده است که منطقی است شتابهای محاسبه شده بروش راهنمای طراحی و روش اجزای محدود با اعمال مقیاس یکسان گردد. جهت مطالعات بیشتر در این خصوص مرجع [۲] معرفی می گردد.

۲-۴-۲-۵ درمود دوم

طبق شکل ۱۸-۵ محل نقاط با دامنه های حداکثر و حداقل در یک چهارم طول کف می باشد لذا بار دینامیکی زیر در محل این نقاط اثر داده می شود.

$$p(t) = [p_0 \exp(-0.35 f_n)] \sin(2\pi f_n t) \Rightarrow$$

$$p(t) = \left[\frac{0.29 \times 1000}{9.81} \exp(-0.35 \times 6.63) \right] \sin(2\pi \times 6.63 t) = [2.9 \sin(41.65 t)] \text{ kgf}$$

پس از تحلیل تاریخچه زمانی خواهیم داشت:

$$\frac{a}{g} \Big|_{\max} = \frac{-2.891E-2}{9.81} \times 100 = 0.295\% \ll 0.5\%$$

مشاهده می شود که بدون اعمال مقیاس (مشابه موداول) شتاب اوج درمود دوم به مراتب کمتر از حد مطلوب است.

لذا نتیجه گرفته می شود فقط مود اول مسئله سازاست که سعی خواهد شد با روشهای سختی یا TMD بهسازی گردد.

۵-۲-۵ افزایش سختی برای ارضای ضوابط ارتعاش مطلوب

با افزایش سختی (افزایش مقاطع فولادی) و اعمال باردینامیکی معادل راهنمای طراحی (طبق بند ۵-۲-۴) اقدام به کاهش شتاب اوج کف کرده تا به حد ۰/۵٪ طبق جدول ۲-۱ محدود گردد. دراین مرحله با توجه به همگرایی خوب تحلیل دستی و اجزای محدود ، فقط ازمدل اجزای محدود استفاده می گردد.

ابتدا تیرفرعی از IPE450 به IPE500 و تیراصلی از IPE500 به IPE550 تبدیل می گردد. پس ازاین تبدیلات مجدداً فواصل مراکزهندسی دال و تیرهای فرعی واصلی درمدل کامپوزیت اصلاح می گردند و بانجام تحلیل مودال فرکانس اساسی (مود اول) ۴/۵۵ هرتز بدست می آید. با این فرکانس مشابه بند قبلی باردینامیکی معادل راهنمای طراحی درحالت رزونانس خواهد شد:

$$p(t) = [p_0 \exp(-0.35 f_n)] \sin(2\pi f_n t) \Rightarrow$$

$$p(t) = \left[\frac{0.29 \times 100}{9.81} \exp(-0.35 \times 4.55) \right] \sin(2\pi \times 4.55 t) = [6.01 \sin(28.34 t)] \text{ kgf}$$

با اعمال مقیاس ۰/۷۳۳ (طبق بند ۵-۲-۴-۱) به باردینامیکی فوق و اثر دادن در مرکز کف مذکور پس از انجام تحلیل دینامیکی شتاب اوج خواهد شد:

$$atj oint 1530 \rightarrow \frac{a}{g} \Big|_{\max.} = \frac{0.05243}{9.81} \times 100 = 0.534\% > 0.5\% \Rightarrow N.E.$$

مشاهده می گردد شتاب اوج اندکی از حد مطلوب آیین نامه بالاتر است مجدداً ابعاد تیر اصلی و فرعی را تغییر داده می شود این مرتبه تیر اصلی و تیرهای فرعی هر دو IPE550 انتخاب می گردند که پس از تحلیل مودال فرکانس اساسی کف اداری ۴/۷۷ هرتز بدست می آید که پس از طی پروسه فوق، شتاب اوج کمتر از حد مطلوب خواهد شد و کف رضایت بخش تلقی می گردد:

$$at joint 1530 \rightarrow \frac{a}{g} \Big|_{\max.} = \frac{0.04886}{9.81} \times 100 = 0.498\% < 0.5\% \Rightarrow O.K.$$

۵-۲-۶ ارتعاش مطلوب با نصب TMD

از بند ۵-۲-۴-۱ نتیجه بدست آمده این است که قبل از نصب TMD شتاب نسبی اوج (نسبت به شتاب جاذبه) در وسط کف با بار دینامیکی معادل ۰/۶۶٪ می باشد.

حال قبل از نصب TMD مقدار میرایی کف را به روش سعی و خطا افزایش داده تا شتاب اوج نسبی به حد ۰/۵٪ برسد. پس از تحلیل با $\xi_e = 3\% = 0.03$ شتاب به حد مطلوب می رسد.

حال ادامه محاسبات :

$$\{\xi = 0.02, \xi_e = 0.03\} \xrightarrow{\text{figure (4-9)}} \bar{m} = 0.0025 \Rightarrow use \dots \bar{m} = 0.0025$$

$$\{\bar{m} = 0.0025, \xi = 0.02\} \xrightarrow{\text{figure (4-7)}} f_{opt.} = 0.995$$

$$\{\bar{m} = 0.0025, \xi = 0.02\} \xrightarrow{\text{figure (4-8)}} \xi_d \Big|_{opt.} = 0.03$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 4.04 = 25.38 \text{ rad/s} \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 25.25 \text{ rad/s}$$

$$m_d = \bar{m} \times \tilde{m}_{1e} = 0.0025 \times 2016 \rightarrow m_d = 5.04 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 25.25^2 \times 5.04 = 3213 \text{ kgf} / m$$

$$c_d = 2\xi_d \Big|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.03 \times 25.25 \times 5.04 \rightarrow c_d = 7.63 \text{ kgf} \cdot \text{sec.} / m$$

$$\bar{m} = 0.0025 \rightarrow \{k_d = 3213 \text{ kgf} / m, c_d = 7.63 \text{ kgf} \cdot \text{sec.} / m, m_d = 5.04 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m, \xi = 0.02\}$$

پس از تحلیل دینامیکی :

$$\bar{u}_d = (4.216E^{-5} - 5.556E^{-4}) \rightarrow \bar{u}_d = -0.51mm,$$

$$\left. \frac{a}{g} \right|_{\max} = \frac{2.68E-2}{9.81} \times 100 = 0.273\% < 0.5\% \Rightarrow o.k.$$

به عبارت دیگر با نصب جرم (۴۹/۴ کیلوگرم = ۵/۴ * ۹/۸۱) و فنری به سختی ۳۲۱۳ کیلوگرم

نیروبرمتروکمک فنری (میراگر) با نسبت میرایی ۳٪ کاهش درمیزان شتاب اوج کف خواهد شد :

$$\frac{0.273 - 0.66}{0.66} \times 100 = -58.64\%$$

۷-۲-۵ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD

طبق بند ۵-۲-۵. Error! Reference source not found. با تبدیل تیرفرعی از IPE450 به

IPE500 و همچنین با تبدیل تیراصلی از IPE500 به IPE550 برای سه دهانه اختلاف وزن خواهد شد:

$$\Delta W = [(134 - 98.8) \times 0.785 \times 12.15 \times 3(2 + 1) + (134 - 116) \times 0.785 \times 9.15 \times 2] \times 3 = 3797kg$$

اگر در حال حاضر برای تهیه و نصب اسکلت فلزی کف از قرار هر کیلوگرم ۱۵۰۰۰ ریال هزینه شود. آنگاه

هزینه مازاد جهت مقاوم سازی خواهد شد:

$$\cos t = 3797 \times 15000 = 56'959'443 \text{ Rials}$$

برای این نوع TMD با مشخصات فوق الذکر (با توجه به قیمت موجود فنروکمک فنرماشین) اگر به

صورت دست بالا برای هر کدام ۵۰۰۰۰۰۰ ریال هزینه شود جمعاً ۱۵۰۰۰۰۰۰ ریال هزینه خواهد شد

که در نتیجه کاهش در هزینه ها خواهد بود.

$$\frac{56959443 - 15000000}{56959443} \times 100 = 73.7\%$$

به عبارت دیگر با کاربرد TMD حدوداً ۷/۷۳٪ از هزینه بهسازی کاسته خواهد شد. البته این مقایسه در مرحله طراحی است ولی اگر براساس روش متداول سنتی (ارضای ضوابط مقاومت و خیز) کف سازه اداری طراحی و اجرا شده باشد به مراتب استفاده از روش TMD اجرایی تر و با صرفه تر خواهد بود.

۳-۵ کاربرد TMD در سالن ورزش کشتی

تعریف مشخصات کف :

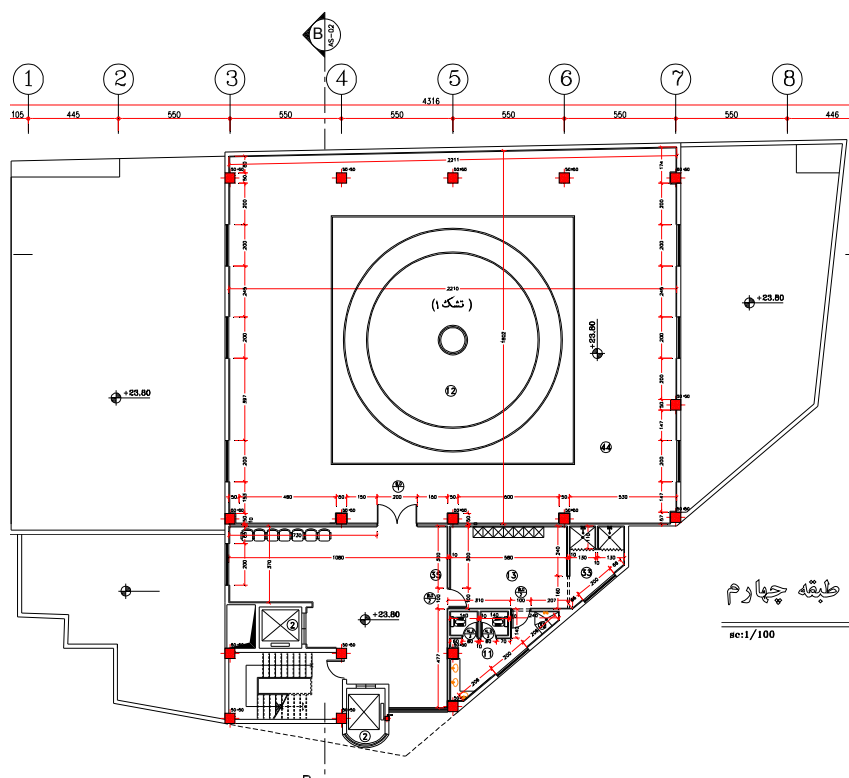
طبق ضوابط راهنمای طراحی، سالن ورزش کشتی در درجه فعالیت‌های هماهنگ^۱ از نوع رقابت ورزشی^۲ طبقه بندی می شود. طبق مرجع [۲۰] بارزنده طراحی سالن تمرینات ورزشی ۵۰۰ کیلوگرم نیروبر مترمربع در نظر گرفته شده است. طبق همین مرجع بار مرده مربوط به سقف کاذب با اندود گچی ۵۰ کیلوگرم نیرو بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

بار مرده اضافی ۱۰۰ کیلوگرم نیرو بر مترمربع جهت کفسازی در نظر گرفته می شود.

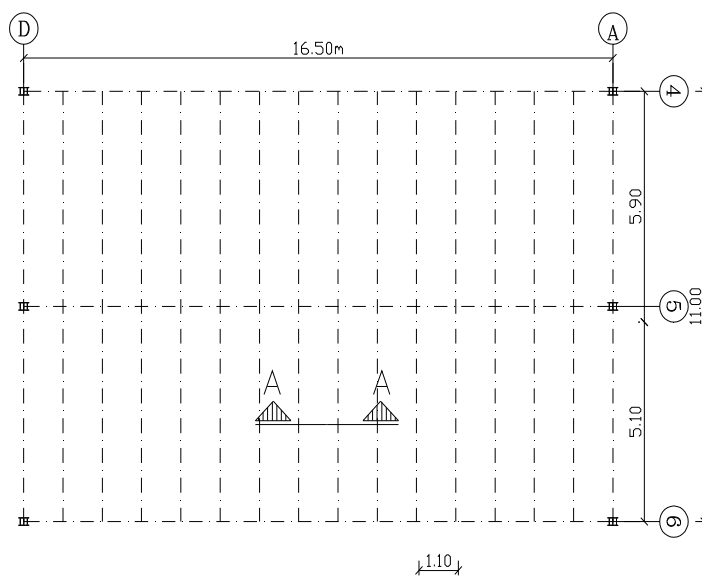
در اشکال ۵-۲۰ تا ۵-۲۲ پلان معماری و پلان تیرریزی و مقطع عرضی کف مذکور نشان داده شده است.

^۱ Rhythmic Activity

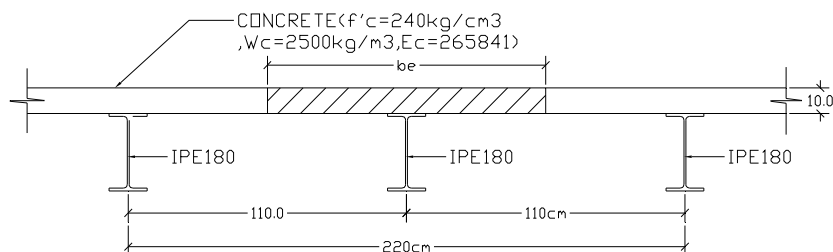
^۲ Sports event



شکل ۵-۲۰: پلان معماری کف سالن ورزش کشتی دریکی از طبقات ساختمان خانه کشتی شهرداری



شکل ۵-۲۱: پلان تیرریزی کف سالن ورزش کشتی طبق آکس بندی پلان معماری



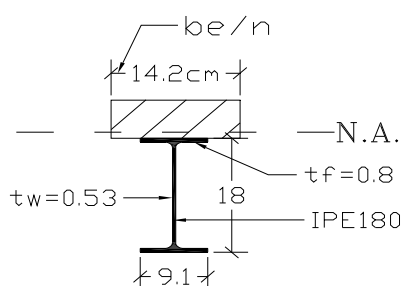
شکل ۵-۲۲: مقطع عرضی کف سالن ورزش کشتی در مرحله طراحی با کنترل معیار مقاومت

۵-۳-۱ طراحی براساس ارضای معیارمقاومت وخیز

براساس روش تنش مجاز طبق مرجع [۱۹]:

۵-۳-۱-۱ کنترل معیارمقاومت

تیرفرعی:



شکل ۵-۲۳: مقطع عرضی تبدیل یافته تیرفرعی در کاربری سالن ورزش کشتی

در طراحی براساس معیارمقاومت

$$L_j = 5.50m$$

$$b_e = \min(0.25L_j, S = 1.10) = 110cm$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.06E6}{265841} = 7.75$$

$$\bar{y} = 20.98, I_{tr.} = 6510cm^4$$

$$S_t = \frac{I_{tr}}{C_t} = 310cm^3; S_c = 927cm^3$$

$$w_j|_{D+L} = (0.1 \times 2500 + 50 + 100 + 500) \times 1.10 + 18.8 = 1008.8kgf / m$$

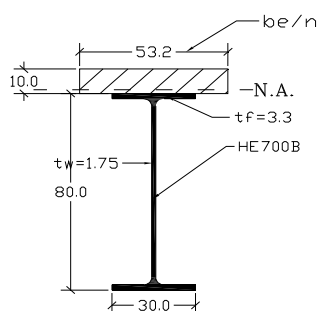
$$w_j|_D = (0.1 \times 2500 + 50 + 100) \times 1.10 + 18.8 = 458.7kgf / m$$

$$M_j|_{\max.} = \frac{w_j \times L^2}{8} = \frac{1008.8 \times 5.5^2}{8} = 3814.53kgf.m \rightarrow f_b = \frac{381453}{310} = 1230 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{f_b}{F_b} = \frac{1230}{1440} = 0.854$$

$$f_c = \frac{381453}{927} = 411 \Rightarrow f_c|_{concrete} = \frac{f_c}{n} = \frac{411}{7.75} = 53 < 0.45f'_c = 108 \Rightarrow o.k.$$

تیر اصلی:



شکل ۵-۲۴: مقطع عرض تبدیل یافته تیر اصلی در کاربری سالن ورزش کشتی

در طراحی براساس معیار مقاومت

$$L_g = 16.50m$$

$$b_e = \min(0.25L_g = 4.125, L_J = 5.50m) = 4.125m$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.06E6}{265841} = 7.75$$

$$\bar{y} = 60.39cm, I_{tr} = 572153cm^4$$

$$S_t = \frac{I_{tr}}{C_t} = 9474cm^3; S_c = 29177cm^3$$

$$w_{g|D+L} = (0.10 \times 2500 + 50 + 100 + 500) \times 5.50 + 306 \times 0.785 = 5190kgf / m$$

$$w_{g|D} = (0.10 \times 2500 + 50 + 100) \times 5.50 + 306 \times 0.785 = 2440kgf / m$$

$$M_{g|_{\max.}} = \frac{w_g \times L^2}{10} = \frac{5190 \times (16.5 - 0.4)^2}{10} = 134530 kgf.m \rightarrow f_b = \frac{13453000}{9474} = 1420 \downarrow$$

$$\Rightarrow \frac{f_b}{F_b} = \frac{1420}{1440} = 0.986$$

$$f_c = \frac{13453000}{29177} = 463 \Rightarrow f_c|_{concrete} = \frac{f_c}{n} = \frac{463}{7.75} = 59.7 < 0.45 f'_c = 108 \Rightarrow o.k.$$

۵-۳-۱-۲ کنترل خیز

تیرفرعی:

$$\delta|_{D+L} = \frac{5 W_J L^4}{384 E_S I_{tr}} = 0.896 < l / 240 = 2.29cm \rightarrow \delta|_L = 0.489 < L / 360 = 1.53cm$$

تیراصلی:

$$\delta|_{D+L} = \frac{5 W_g L^4}{384 E_S I_{tr}} = 2.55 < l / 240 = 6.88cm \rightarrow \delta|_L = 1.35 < L / 360 = 4.58cm$$

۵-۳-۲ کنترل ارتعاش

طبق ضوابط راهنمای ۱۱ طراحی آیین نامه AISC

$$\xrightarrow{\text{table3-2}} \omega_p = 150 \text{ kgf} / \text{m}^2$$

$$\omega_t = \omega_p + (w_j \div s + w_g \div L_j) / 2 = 150 + (458.7 \div 1.10 + 2440 \div 5.5) = 580 \text{ kgf} / \text{m}^2$$

$$\text{first harmonic} \xrightarrow{\text{TABLE 3-2}} \alpha_1 = 0.25, f_1 = 3 \text{ Hz}$$

$$\text{first harmonic} \xrightarrow{\text{TABLE 3-2}} \alpha_2 = 0.05, f_2 = 5 \text{ Hz}$$

۵-۳-۲-۱ تعیین فرکانس اساسی مورد نیاز

طبق رابطه ۳-۱۸ برای فعالیتهای ورزشی، برای دوری از وقوع پدیده رزونانس می

بایست رابطه زیر برقرار باشد.

$$f_s \geq f_i \sqrt{\left(1 + \frac{1.7}{a_0/g} \times \frac{\alpha_i w_p}{w_t}\right)} \quad (۵-۱)$$

طبق جدول ۳-۲ حداکثر شتاب مطلوب برای فعالیتهای ورزشی $\frac{a_0}{g} = \frac{4+7}{2} \% = 0.055$ می باشد.

لذا با جایگذاری مقادیر فوق الذکر در رابطه ۵-۱ برای هارمونیک اول حداقل فرکانس کف

۵/۲ هرتز و برای هارمونیک دوم ۵/۹۳ هرتز بدست می آید. لذا نتیجه گرفته می شود که می بایست

فرکانس اساسی کف حدود ۶ هرتز باشد تا رزونانس صورت نگیرد.

۵-۳-۲-۲ تعیین فرکانس اساسی کف موجود

طبق بند ۳-۲ راهنمای طراحی در محاسبه ممان اینرسی تبدیل یافته برای ارتعاش می بایست مدول

الاستیسیته بتن ۳۵٪ افزایش یابد و عرض موثر از ۲۵٪ به ۴۰٪ افزایش یابد.

لذا با اعمال این موارد مشخصات هندسی تغییر می یابد و نتایج به شرح زیر گزارش می گردد.

تیر فرعی:

$$L_j = 5.50m$$

$$b_e = \min(0.40L_j, S = 1.10) = 110cm$$

$$n = \frac{E_s}{1.35E_c} = \frac{2.06E6}{1.35 \times 265841} = 5.74 \rightarrow b_e / n = 19.2cm$$

$$\bar{y} = 21.45, I_{tr.} = 7083cm^4$$

$$w_j|_{D+\%L} = (0.1 \times 2500 + 50 + 100 + 150) \times 1.10 + 18.8 = 623.8kgf / m$$

$$\Delta_j = \frac{5 W_j L^4}{384 E_s I_{tr}} = 0.509cm \Rightarrow f_j = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}} = 7.902Hz$$

تیر اصلی:

$$L_g = 16.50m$$

$$b_e = \min(0.40L_g, L_j = 5.50) = 550cm$$

$$n = \frac{E_s}{1.35E_c} = \frac{2.06E6}{1.35 \times 265841} = 5.74 \rightarrow b_e / n = 95.8cm$$

$$\bar{y} = 65.32cm, I_{tr.} = 635957 cm^4$$

$$w_g|_{D+\%L} = (0.1 \times 2500 + 50 + 100 + 150) \times 5.50 + 306 \times 0.785 = 3265 kgf / m$$

$$\Delta_g = \frac{5 W_g L^4}{384 E_s I_{tr}} = 2.40cm$$

$$column: 3IPE360R + 4PL400 * 25mm \xrightarrow{file:Wresling-s} I_C = 153840cm^3 \swarrow$$

$$k_c = \frac{I_c}{L_c} = 384.6$$

$$\xrightarrow{relation3-17} \Delta = 0.677 \Rightarrow \Delta'_g = \Delta \times \Delta_g = 0.677 \times 2.4 = 1.62cm$$

$$f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta'_g}} = 4.423Hz$$

طبق رابطه ۳-۹ فرکانس اساسی کف خواهد شد:

$$\frac{1}{f_s^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \Rightarrow f_s = 3.86\text{Hz} < 6\text{Hz} \Rightarrow N.E.$$

از آنجا که فرکانس اساسی کف موجود کمتر از فرکانس لازم طبق بند ۵-۳-۲-۱ می باشد لذا ارتعاش کف نامطلوب می باشد و می بایست با افزایش سختی ، نصب میراگرها (مثل TMD) یا موارد دیگر، کف را مجهز نمود.

۵-۳-۳ مقایسه نتایج با نرم افزار و تعیین پارامترهای مودال

تیرفرعی:

$$\Delta f_n = \frac{0.685 - 0.854}{0.864} = -19.8\%$$

$$\Delta d = \frac{0.345 - 0.896}{0.896} = -61\%$$

در رابطه فوق Δf_n : اختلاف در نسبت تنشهای خمشی بروش دستی و نرم افزاری می باشد.

و Δd اختلاف در محاسبه خیز می باشد.

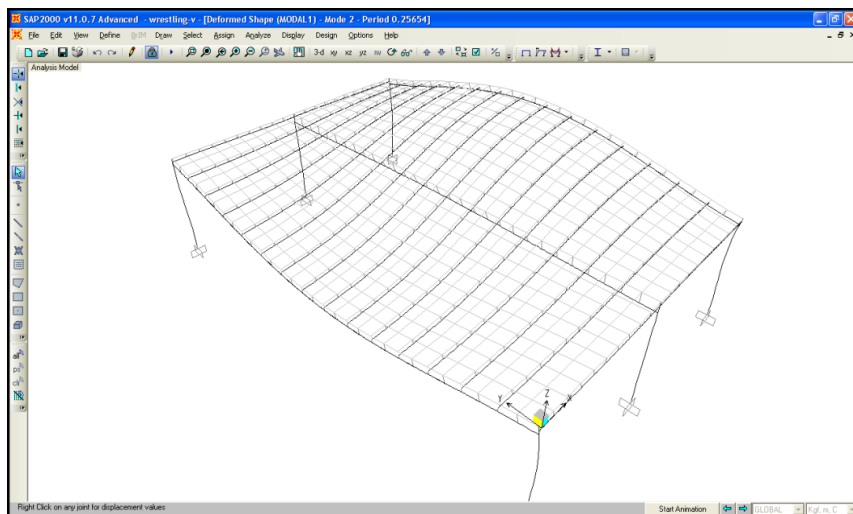
تیر اصلی میانی:

$$\Delta f_n = \frac{0.849 - 0.986}{0.986} \times 100 = -13.9\%$$

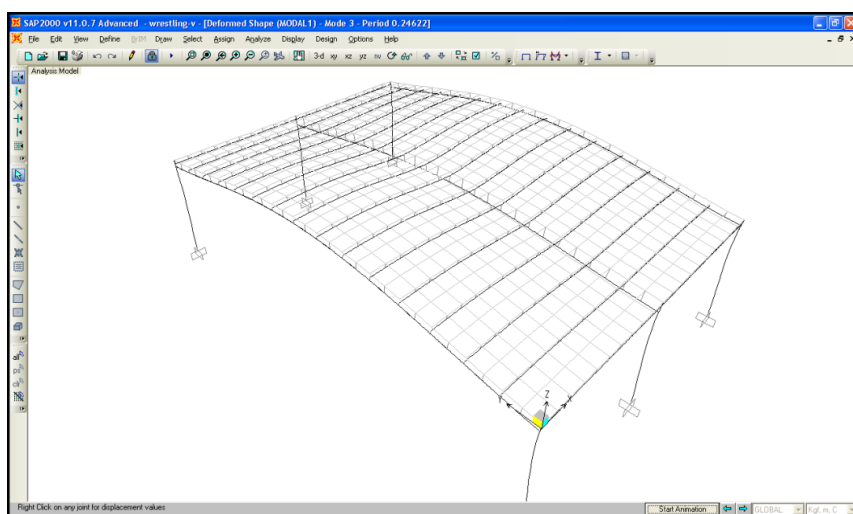
$$\Delta d = \frac{2.61 - 2.55}{2.55} \times 100 = +2.35\%$$

۵-۳-۳-۱ اشکال مودی و پارامترهای مودال

در اشکال ۵-۲۵ و ۵-۲۶ مودهای اول و دوم حاصل از تحلیل مودال مدل اجزای محدود کف مذکور با در نظر گرفتن اثر ستونها نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۵: شکل مود اول کف سالن ورزش کشتی با فرکانس ۳/۹۰ هرتز



شکل ۵-۲۶: شکل مود دوم کف سالن ورزش کشتی با فرکانس ۴/۰۶ هرتز

مود اول با فرکانس ۳/۹۰ هرتز:

$$\varphi_{1(1536)} = 5.13 E - 5 \approx 0$$

$$\varphi_{1(3411)} = -0.01959, \varphi_{1(3407)} = -0.01905$$

$$\varphi_{1(2239)} = +0.01982, \varphi_{1(2235)} = +0.01927$$

توضیح اینکه گره های ۱۵۳۶ در وسط تیر اصلی میانی و گره های ۳۴۱۱ و ۳۴۰۷ به ترتیب در وسط وبه

فاصله ۱/۱۰ متر از وسط درروی تیر اصلی کناری می باشند. وبه همین صورت گره های ۲۲۳۹ و ۲۲۳۵

مود دوم با فرکانس ۴/۰۶ هرتز:

$$\varphi_{2(1536)} = +0.01099 \text{ و } \varphi_{2(246)} = +0.01033$$

$$\varphi_{2(3411)} = +0.01487, \varphi_{2(3405)} = +0.01396$$

$$\varphi_{1(2239)} = +0.01487, \varphi_{1(2235)} = +0.01447$$

توضیح اینکه گره شماره ۲۴۶ در طرفین گره ۱۵۳۶ به فاصله ۱/۶۵ متر وجود دارند.

از پارامترهای مودال فوق الذکر جهت طراحی TMD استفاده خواهد شد.

۴-۳-۵ تعیین بار دینامیکی معادل راهنمای طراحی

برای فعالیتهای هماهنگ شتاب اوج کف از رابطه ۴-۲ راهنمای طراحی به شرح زیر محاسبه می

گردد. [۳]

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3\alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[\frac{2\xi f_n}{f}\right]^2}} \quad (۲-۵)$$

در واقع این رابطه فرم دیگری از رابطه ۳-۱۸ می باشد که در آن میرایی کف لحاظ گردیده است.

هارمونیک اول:

با جایگذاری مقادیر $f_n = 3.86 \text{ Hz}$ و $\xi = 5\%$ و فرکانس نیروی وارده $f = 3 \text{ Hz}$ شتاب اوج نسبی خواهد

شد:

$$\frac{a_p}{g} \Big|_{first} = 12.58\% > \frac{a_0}{g} = 5.5\% \rightarrow N.E.$$

هارمونیک دوم:

که با جایگذاری مقادیر $f_n = 3.86Hz$ و $\xi = 5\%$ و فرکانس نیروی وارده $f = 5Hz$ شتاب اوج نسبی خواهد شد:

$$\frac{a_p}{g} \Big|_{second} = 4.08\% < \frac{a_0}{g} = 5.5\% \rightarrow o.k.$$

از آنجاییکه شتاب بدست آمده طبق تحلیل اجزای محدود با راهنمای طراحی مغایرت دارد با اعمال مقیاس به بارهای دینامیکی به شرح ذیل شبیه سازی صورت می گیرد: [۲]

بارهای دینامیکی طبق روابط ۳-۲۱ و ۳-۲۲ برای سالن ورزش کشتی به شرح زیر می باشد:

$$F(t) = 38.22 \sin(2\pi \times 3t) \rightarrow MHST1 \quad \text{برای هارمونیک اول:}$$

$$F(t) = 7.65 \sin(2\pi \times 5t) \rightarrow MHST2 \quad \text{برای هارمونیک دوم:}$$

پس از اعمال بارهای دینامیکی فوق الذکر (بارهای واحد سطح) به مدل اجزای محدود، در گره ۳۴۱۱ (وسط تیر اصلی کناری) تحت ترکیب بار MHST1، شتاب اوج و مقیاس بارگذاری برای ترکیب بار هارمونیک اول خواهد شد:

$$\frac{a}{g} \Big|_{3411} = \frac{-1.575}{9.81} \times 100 = 16.06\% \Rightarrow scale \Big|_{MHST1} = \frac{12.58}{16.05} = 0.784$$

و به همین صورت برای ترکیب بار MHST2 مقیاس ۰/۵۷۴ بدست می آید. که پس از اعمال مقیاس در بارگذاری دینامیکی، نتایج با حل دستی (طبق راهنمای طراحی) یکسان می گردد.

۵-۳-۵ افزایش سختی برای کنترل ارتعاش کف

پس از بدست آوردن باردینامیکی شبیه سازی شده دریند قبلی لازم است برای مقایسه با حالت استفاده از TMD با افزایش سختی شتاب اوج کف کاهش داده شود. در این مرحله با توجه به پیچیدگی مدل از محاسبات دستی صرف نظرمی گردد.

لذا جهت داشتن ارتعاش مطلوب پس از چند مرحله سعی و خطا تیرهای فرعی از IPE180 به IPE300، تیر اصلی میانی از HE700B به G1200*400*30mm و همچنین تیرهای اصلی کناری از HE400B به HE800B تغییر پیدا کردند که پس از اعمال بارهای دینامیکی شبیه سازی شده حداکثر شتاب نسبی تحت ترکیب بارهای MHST1,2 خواهد شد:

$$\begin{aligned} MHST1: \quad \frac{a}{g} \Big|_{3411} &= \frac{-2.87E-1}{9.81} \times 100 = 2.92\%, & \frac{a}{g} \Big|_{1536} &= \frac{3.56E-1}{9.81} \times 100 = 3.63\%, \\ MHST2: \quad \frac{a}{g} \Big|_{3411} &= \frac{-1.966E-1}{9.81} \times 100 = 2.62\%, & \frac{a}{g} \Big|_{1536} &= \frac{-2.312E-1}{9.81} \times 100 = 2.35\%, \end{aligned}$$

پس از استفاده از ترکیب هارمونیک ها طبق رابطه ۳-۲۳ شتاب اوج نسبی ۴/۸٪ در گره ۳۴۱۱ (وسط تیر اصلی کناری) محاسبه می گردد که از حد مجاز پایین تر است و لذا کف رضایت بخش تلقی می گردد.

۵-۳-۶ ارتعاش مطلوب با نصب TMD

قبل از نصب TMD مطابق بند ۵-۳-۴۵-۳-۴۴-۳-۴ شتاب اوج نسبی کف، تحت بارهای دینامیکی معادل به شرح ذیل می باشد.

$$MHST1: \frac{a}{g}\bigg|_{3411} = \frac{1.235}{9.81} \times 100 = 12.58\%, \quad \frac{a}{g}\bigg|_{1536} = \frac{0.95}{9.81} \times 100 = -9.69\%,$$

$$MHST2: \frac{a}{g}\bigg|_{3411} = \frac{4.0E-1}{9.81} \times 100 = 4.08\%, \quad \frac{a}{g}\bigg|_{1536} = \frac{2.674E-1}{9.81} \times 100 = 2.72\%,$$

پس از استفاده از ترکیب هارمونیک ها طبق رابطه ۳-۲۳ شتاب اوج نسبی کف ۰.۴/۰۹٪ در گره

۳۴۱۱ (وسط تیر اصلی کناری) محاسبه می گردد که از حد مجاز ۵/۵٪ خیلی بالاتر است. در این مرحله با

استفاده از TMD شتاب های کف تعدیل خواهد شد.

ابتدا با آزمون سعی و خطا میرایی نسبی کف را افزایش می دهیم تا شتاب نسبی کف مطلوب گردد. لذا

پس از چند مرحله سعی و خطا با تبدیل میرایی نسبی کف از ۰.۵/۰ به ۰.۴٪ شتاب های نسبی کف خواهد

شد.

$$MHST1: \frac{a}{g}\bigg|_{3411} = \frac{-4.57E-1}{9.81} \times 100 = 4.66\%, \quad \frac{a}{g}\bigg|_{1536} = \frac{-3.72E-1}{9.81} \times 100 = -3.79\%,$$

$$MHST2: \frac{a}{g}\bigg|_{3411} = \frac{1.10E-1}{9.81} \times 100 = 1.12\%, \quad \frac{a}{g}\bigg|_{1536} = \frac{0.949E-1}{9.81} \times 100 = 0.967\%,$$

پس از استفاده از ترکیب هارمونیک ها طبق رابطه ۳-۲۳ شتاب نسبی حداکثر ۰.۵/۰۲٪ در گره

۳۴۱۱ (وسط تیر اصلی کناری) محاسبه می گردد که در حد مجاز است و لذا کف رضایت بخش تلقی می

گردد. نتیجه مطلب اینکه اگر بتوان از نقطه نظری میرایی موجود کف را به ۰.۴٪ (افزایش

۷۰٪ در میرایی موجود کف) افزایش داد آنگاه شتاب کف مطلوب است.

در ادامه به طراحی TMD برای مود اول و دوم یا ترکیبی از این دو مود پرداخته می شود.

۵-۳-۶-۱ طراحی TMD درمود اول با فرکانس ۳/۹۰ هرتز

$$\bar{m}_{1e} = m_{d1} \times \{(\Phi_{2(3411)}^2 + \Phi_{1(3405)}^2 \times 2) \Rightarrow 0.10 = (0.0195^2 + 0.01839^2)$$

$$\Rightarrow m_{d1} = 47.165 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$\{\xi = 0.05, \xi_e = 0.40\} \xrightarrow{\text{figure(4-9)}} \bar{m} > 0.10 \Rightarrow use \dots \bar{m} = 0.10 = 10\%$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure(4-7)}} f_{opt.} = 0.852$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure(4-8)}} \xi_d|_{opt.} = 0.20$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 3.90 = 24.50 \text{ rad} / s \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 20.88 \text{ rad} / s$$

$$m_d = 6 @ 47.165 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 20.88^2 \times 47.165 = 20563 \text{ kgf} / m$$

$$c_d = 2\xi_d|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.20 \times 20.88 \times 47.165 \rightarrow c_d = 394 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / m$$

پس از نصب ۶ دستگاه TMD در تیرهای اصلی کناری (هریک ۳ دستگاه) در وسط وبه فواصل مساوی

در طرفین آن شتاب اوج نسبی خواهد شد:

$$MHST1: \frac{a}{g}|_{3411} = \frac{-0.804}{9.81} \times 100 = 8.19\%, \quad \frac{a}{g}|_{1536} = \frac{-0.73}{9.81} \times 100 = -7.45\%,$$

$$MHST2: \frac{a}{g}|_{3411} = \frac{2.554E-1}{9.81} \times 100 = 2.60\%, \quad \frac{a}{g}|_{1536} = \frac{2.14E-1}{9.81} \times 100 = 2.19\%,$$

پس از استفاده از ترکیب هارمونیک ها طبق رابطه ۳-۲۳ شتاب اوج نسبی کف ۹/۱۴٪ در گره

۳۴۱۱ (وسط تیر اصلی کناری) محاسبه می گردد که بالاتر از حد مجاز است (ردیف ۱ از جدول ۵-۱).

۵-۳-۶-۲ طراحی TMD درمود دوم با فرکانس ۴/۰۶ هرتز

حال حالتی را بررسی نموده که طبق مود دوم برای هر تیر اصلی ۳ دستگاه TMD نصب شود. (در مجموع

۹ دستگاه)

$$\bar{m}_{1e} = m_{d1} \times \{(\Phi_{2(1536)}^2 + \Phi_{2(246)}^2 \times 2 + (\Phi_{2(3411)}^2 + \Phi_{2(3405)}^2 \times 2) \times 2\} = 0.10 \Rightarrow$$

$$m_{d1} = 64.27 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure (4-7)}} f_{opt.} = 0.852$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure (4-8)}} \xi_d|_{opt.} = 0.20$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 4.06 = 25.50 \text{ rad} / s \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 21.73 \text{ rad} / s$$

$$m_d = 9 @ 64.27 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 21.73^2 \times 64.27 = 30348 \text{ kgf} / m$$

$$c_d = 2\xi_d|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.20 \times 21.73 \times 64.27 \rightarrow c_d = 559 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / m$$

باتحلیل دینامیکی، شتاب اوج نسبی پس از ترکیب هارمونیک ها مشابه قبل، بطور خلاصه خواهد

شد (ردیف ۲ از جدول ۵-۱):

$$\frac{a}{g}|_{3411} = 7.98\% \quad \frac{a}{g}|_{1536} = 6.73\% > \frac{a_0}{g} = 5.5\% \Rightarrow N.E.$$

لذا نتیجه گرفته می شود که این حالت نیز جوابگوی نیاز نیست و می بایست روشهای دیگر را بررسی

نمود.

۵-۳-۶-۳ طراحی TMD در حالت ترکیبی از مودهای اول و دوم

در این مرحله با استفاده از دستگاه TMD طبق مود اول و ۳ دستگاه TMD برای مود دوم به شرح ذیل

خواهیم داشت :

$$\bar{m}_{1e} = m_{d1} \times (\Phi_{2(1536)}^2 + \Phi_{1(246)}^2 \times 2) \Rightarrow 0.10 = m_{d1} \times (0.01099^2 + 0.01033^2 \times 2)$$

$$\Rightarrow m_{d1} = 299.221 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / m$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure(4-7)}} f_{opt.} = 0.852$$

$$\{\bar{m} = 0.10, \xi = 0.05\} \xrightarrow{\text{figure(4-8)}} \xi_d|_{opt.} = 0.20$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 4.06 = 25.50 \text{ rad/s} \rightarrow f_{opt.} = \frac{\omega_d}{\omega_1} \Rightarrow \omega_d = 21.73 \text{ rad/s}$$

$$m_d = 9 @ 64.27 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$$

$$k_d = \omega_d^2 m_d = 21.73^2 \times 299.22 = 141290 \text{ kgf/m}$$

$$c_d = 2\xi_d|_{opt.} \omega_d m_d = 2 \times 0.20 \times 21.73 \times 299.22 \rightarrow c_d = 2601 \text{ kgf} \cdot \text{sec.} / \text{m}$$

بطور خلاصه شتاب اوج نسبی کف مشابه بند قبلی خواهد شد (ردیف ۳ از جدول ۵-۱):

$$\frac{a}{g}|_{3411} = 7.39\% \quad \frac{a}{g}|_{1536} = 5.71\% > \frac{a_0}{g} = 5.5\% \Rightarrow N.E.$$

نتیجه مطلب این است که نصب TMD در حالت ترکیب مودها دارای کاهش شتاب بهتری نسبت به

حالت های منفرد می باشد ولی با ذکر این نکته که در این حالت با اتخاذ جرم بیشتری از TMD کاهش

شتاب صورت گرفته است.

پس از بررسی ۱۴ حالت متعدد ممکن ، نتایج در جداول ۵-۱ تا ۵-۳ خلاصه می گردد.

پس از مرور نتایج جداول فوق الذکر این نتیجه بدست می آید که با افزایش نسبت میرایی میراگر شتاب

اوج کاهش چشمگیری دارد لذا از لحاظ تئوری جواب بهینه مسئله، ردیف ۱۴ از جدول ۵-۳ می باشد.

در اینجا ذکر این مطلب ضروری است که با بررسی کارهای انجام شده ، تاکنون حداکثر نسبت میرایی

میراگرهای بکار گرفته شده کمتر از ۳۰٪ بوده و لازم است مهندسان محاسب قبل از طراحی TMD با

نسبت میرایی بیشتر از ۳۰٪ با سازندگان این محصولات هماهنگی های لازم را داشته باشد.

جدول ۵-۱: مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی

کاهش شتاب نسبت به حالت بدون TMD	$\left \frac{a}{g} \right _{\text{m}}$ (%)	k_d (kgf/m)	c_d (kgf/m)	جرم کل TMD (kg)	ξ_d (%)	m_d (kg/sec ² /m)	تعداد TMD	14.09 در حالت بدون TMD درصد شتاب نسبی اوج در وسط شاهتیرکنار		$\bar{m} = \frac{m_i}{m_s}$ (%)	توضیحات	$\frac{f_{opt}}{\omega_j} = \frac{\omega_j}{\omega}$
-35.13	9.14	20563.0	394.0	2776	0.200	47.165	6	0.852	0.10	0.10	مود اول با نصب سه TMD هر شاهتیرکناری (ج معا 6)	1
-43.36	7.98	30348.0	559.0	5674	0.200	64.270	9	0.852	0.10	0.10	مود دوم با نصب سه TMD هر شاهتیر (جمعا 9)	2
-35.13	7.39	20563.0	394.0	11582	0.200	47.165	6	0.852	0.10	0.10	مود اول با نصب سه TMD هر شاهتیرکناری (ج معا 6)	3
		141290.0	2601.0		0.200	299.220	3	0.852			مود دوم با نصب 3TMD هر شاهتیر وسط (جمعا 3)	
-48.97	7.19	40113.0	786.0	8510	0.200	96.390	9	0.80	0.15	0.15	مود دوم با نصب سه TMD هر شاهتیر (جمعا 9)	4
-38.33	8.69	50813.0	885.0	8510	0.200	96.390	9	0.90	0.15	0.15	مود دوم با نصب سه TMD هر شاهتیر (جمعا 9)	5
-50.39	6.99	26954.0	662.8	12970	0.240	70.740	6	0.797	0.15	0.15	مود اول با نصب سه TMD هر شاهتیرکناری (ج معا 6)	6
		141290.0	2601.0		0.200	299.220	3	0.852	0.10	0.10	مود دوم با نصب 3TMD هر شاهتیر وسط (جمعا 3)	

جدول ۵-۲: ادامه مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی

در حالت بدون tmd درصد شتاب نسبی اوج در وسط شاهتیر کمتر										
14.09										
ردیف	توضیحات	$\bar{m} = \frac{m_d}{\sum m_i}$	$f_{opt} = \frac{\omega_d}{\omega}$	تعداد tmd	m_d (kg/sec ² /m)	ξ_d (%)	جرم کل tmd بر حسب (kg)	c_d (kgf/m)	k_d (kgf/m)	کاهش شتاب نسبت به حالت بدون TMD
7	مود اول با نصب سه tmd در هر شاهتیر کناری (جمعاً 6)	0.10	0.852	6	47.165	0.400	11582	788.0	20563.0	-57.70
	مود دوم با نصب 3tmd در شا هتیر وسط (ج معاً 3)		0.852	3	299.220	0.400		5202.0	141290.0	
8	مود اول با نصب سه tmd در هر شاهتیر کناری (جمعاً 6)	0.10	0.852	6	47.165	0.600	11582	1182.0	20563.0	-64.73
	مود دوم با نصب 3tmd در شا هتیر وسط (ج معاً 3)		0.852	3	299.220	0.600		7802.0	141290.0	
9	مود دوم با نصب سه tmd در هر شاهتیر (جمعاً 9)	0.20	0.747	9	128.520	0.275	11347	1347.0	46689.0	-54.01
10	مود دوم با نصب سه tmd در هر شاهتیر (جمعاً 9)	0.30	0.660	9	192.780	0.330	17021	2143.0	54670.0	-58.27

جدول ۵-۳: ادامه مقایسه حالت‌های مختلف نصب TMD در کف سالن ورزش کشتی

ردیف	توضیحات	$\bar{m} = \frac{m_i}{m_t}$	$f_{opt} = \frac{\omega_d}{\omega}$	در حالت بدون tmd درصد شتاب نسبی اوج در وسط شاهتیرکنار			جرم کل tmd بر حسب (kg)	c_d (kgf / m)	k_d (kgf / m)	$\frac{a_p}{g} \Big _{max}$ (%)	کاهش شتاب نسبت به حالت بدون TMD
				تعداد tmd	$\frac{m_u}{m_t}$ (kgf / m)	ξ_d (%)					
11	موداول با نصب 2tmd در هر شاهتیرکناری (جمعاً 4)	0.20	0.747	4	141.480	0.400	11226	2071.0	47380.0	5.96	-57.70
	مود دوم با نصب 3tmd در شاه تیرها (جمعاً 9)	0.10	0.852	9	64.270	0.200		559.0	30348.0		
12	موداول با نصب 2tmd در هر شاهتیرکناری (جمعاً 4)	0.20	0.747	4	141.480	0.600	11226	3107.0	47380.0	4.42	-68.63
	مود دوم با نصب 3tmd در شاه تیرها (جمعاً 9)	0.10	0.852	9	64.270	0.600		1677.0	30348.0		
13	مود اول سه نصب سه tmd در هر شا هتیرکناری (جم عاً 6)	0.1	0.852	6	47.165	0.6	2776	1182	20563	6.40	-54.58
14	مود دوم با نصب سه tmd در هر شا هتیر (جمعاً 9)	0.1	0.852	9	64.27	0.6	5674	1677	30348	5.39	-61.75

۵-۳-۷ مقایسه حالت افزایش سختی و نصب TMD

به جهت داشتن ارتعاش مطلوب درروش تقویت سازه ای طبق بند ۵-۳-۵ با تبدیل تیرفرعی از IPE180 به IPE300 و تبدیل تیراصلی میانی از HE700B به HE1200×400×30 و

همچنین تیرهای اصلی کناری از HE400B به HE800B اختلاف وزن فولاد مصرفی با حالت معمول

(حالت کنترل کف براساس معیارمقاومت و خیز) به شرح زیر محاسبه می گردد.

$$\Delta W = \{[(468-306) + 2 \times (334-198)] \times 16.50 + 2 \times 17 \times 5.50 \times (53.8-23.9)\} \times 0.785 = 10010 \text{ kg}$$

براساس ردیف ۱۴ جدول ۵-۳ با اتخاذ نسبت جرم بهینه TMD به مقدار 0.10 درمجموع برای نصب

۹ عدد TMD، جرم مورد نیاز ۵۶۷۴ کیلوگرم و نسبت میرایی میراگر 0.60 می باشد. در نتیجه برای داشتن

ارتعاش مطلوب در مرحله طراحی کف سالن ورزشی کشتی، استفاده از TMD در مقایسه با حالت تقویت

سازه ای (با جرم ۱۰۰۱۰ کیلوگرم) اختلاف وزن فولاد مصرفی ۴۳۳۶ کیلوگرم بدست می آید که

تقریباً با هزینه تهیه و نصب ۹ دستگاه TMD برابری می کند. لذا نتیجه گرفته می شود از نقطه نظر

اقتصادی در مرحله طراحی کاربرد TMD در فعالیتهای هارمونیک مقرون به صرفه نیست. اما در مورد

سازه هایی که در گذشته طراحی و اجرا گردیده اند شرایط می تواند متفاوت باشد و ممکن است با توجه

به شرایط اجرایی، محلی و احیاناً الزامات معماری تقویت سازه ای مقدور نباشد یا هزینه آن

بسیار بیشتر باشد که در این شرایط استفاده از TMD می تواند اقتصادی و موثر باشد مثل پل هزاره اول

لندن (شکل ۵-۱۱) که بدلیل الزامات معماری تقویت سازه ای صورت نگرفت. [۹]

فصل ۶ نتایج

خلاصه:

- دربخش اول تمرکز بر نحوه پیدایش علم ارتعاشات کف ها و مروری بر مطالعات صورت گرفته در این زمینه بوده است. نتیجه این مطالعات، نمودار اصلاح شده حد مطلوب ارتعاش از جنبه راحتی انسان در کاربریهای ناشی از فعالیتهای انسانی می باشد. سپس جهت حل ارتعاشات نامطلوب کف ها به بحث پیرامون بکارگیری انواع میراگرها بویژه میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) پرداخته شده است.

- دربخش دوم ضوابط کنترل ارتعاش، مطابق ((راهنمای ۱۱ آیین نامه فولاد آمریکا یا به طور خلاصه راهنمای طراحی)) به اجمال اشاره شده و نحوه مدلسازی کف های کامپوزیت و میراگرهای جرمی تنظیم شده به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار SAP2000 بیان شده است. در ادامه به محاسبه بارهای دینامیکی معادل راهنمای طراحی، جهت بارگذاری مدل اجزای محدود پرداخته شده است.

- بخش سوم به اصول تئوری ریاضی TMD اختصاص دارد؛ ابتدا سیستم سازه ای یک درجه آزادی مجهز به TMD با حالات مختلف میرایی و یسکوز مورد بحث قرار گرفته است، سپس روابط و نمودارهایی برای تعیین پارامترهای بهینه طراحی TMD برای سیستم یک درجه آزادی ارائه گردیده و در ادامه با ارائه تبدیلاتی استفاده از روابط و نمودارهای سیستم یک درجه آزادی برای سیستم های چند درجه آزادی امکان پذیر شده است.

- دربخش چهارم کاربرد عملی TMD در قالب سه مثال با کاربری های پل عابر پیاده، اداره الکترونیکی و سالن ورزشی کشتی مورد بحث قرار گرفته و نشان داده شده است که استفاده از TMD موفقیت آمیزی باشد. پس از شبیه سازی عددی بر روی مدل های فوق به شرح ذیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته اند.

نتایج:

(۱) در این تحقیق با استفاده از تکنیک های اجزای محدود، مدل سازی کف های کامپوزیت بتنی و فولادی با استفاده از نرم افزار SAP2000 به خوبی صورت گرفته است. در صورتیکه در این نرم افزار تاکنون گزینه آماده ای جهت مدل سازی کف های کامپوزیت پیش بینی نشده است.

(۲) در این تحقیق با استفاده از روابط دینامیک سازه ها، بارهای دینامیکی معادل راهنمای طراحی جهت فعالیتهای انسانی ناشی از راه رفتن و حرکات هماهنگ بدست آمده است. این بارها در تحلیل دینامیکی به روش تاریخچه زمانی (THA) در مدل اجزای محدود توسط نرم افزار مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است.

(۳) با کنترل ضوابط ارتعاشی در خصوص کف مورد نظروتعیین مودارتعاشی نامطلوب، پس از محاسبه پارامترهای طراحی TMD، نصب آن در محل حداکثر تغییر شکل مودی صورت می گیرد.

(۴) در ضمن مدل سازی کف های کامپوزیت انطباق خوبی بین فرکانسهای اساسی (فرکانس موداول) بدست آمده از تحلیل مودال به روش اجزای محدود و حل دستی مطابق راهنمای طراحی بدست آمده است.

(۵) شتاب های بدست آمده از روش اجزای محدود، منتهی به تحلیل دینامیکی تفاوت فاحشی با راهنمای طراحی داشته است. یکی از علل اختلاف این است که مدل اجزای محدود فقط میرایی ویسکوز (میرایی متناسب با سرعت) را در نظر می گیرد و در مدل سازی به طور مستقیم قادر به در نظر گرفتن میرایی اصطکاکی و نحوه انتشار انرژی نمی باشد.

۶) در این تحقیق جهت یکسان سازی شتاب های اوج بدست آمده از تحلیل دستی مطابق راهنمای طراحی و روش اجزای محدود، مقیاسهایی در بارگذاری دینامیکی لحاظ گردیده است.

۷) در مثال های پل عابر پیاده و کف اداره الکترونیکی پس از کنترل ضوابط ارتعاش براساس راهنمای طراحی، شتاب های اوج نسبی این کف ها نامطلوب گزارش شده است . جهت بهسازی این کفها دوره

حل صورت گرفته است: ۱- تقویت سازه ای ۲- کاربرد TMD

استفاده از TMD کاهش چشمگیری در شتاب های اوج نسبی این کف ها داشته و از طرفی در مقایسه با روش تقویت سازه ای کاهش نسبتاً خوبی در هزینه ها را به همراه داشته است.

۸) از کاربرد TMD در کف های پل عابر پیاده و اداره الکترونیکی ، این نتیجه حاصل می شود که برای فعالیتهای ناشی از راه رفتن استفاده از TMD در کف های دارای میرایی کم بسیار موثر می باشد.

۹) در کاربرد TMD در سالن ورزشی کشتی پس از کنترل ضابطه ارتعاش برای فعالیتهای هماهنگ ، فرکانس اساسی این کف از حداقل مورد نیاز بسیار کمتر بوده است . یعنی ارتعاشات کف نامطلوب بوده و پس از اتخاذ انواع حالت های نصب TMD و بررسیهای صورت گرفته ، استفاده از TMD موفقیت آمیز گزارش شده است.

۱۰) از مقایسه کاربری سالن ورزشی کشتی (فعالیت هماهنگ) با کاربریهای مربوط به دو مثال قبلی (فعالیت ناشی از راه رفتن) این نتیجه بدست آمده که برای این کف با توجه به میرایی بالا (ناشی از همراهی و مشارکت افراد در میرایی کف) نیاز به درصد جرم زیاد TMD برای کاهش شتاب می باشد، لذا کاربرد TMD در این نوع کف مقرون به صرفه نمی باشد و از طرفی بعلت درصد جرم زیاد

TMD می بایست مجدداً مقاومت سازه ای این کف ها کنترل شده تا مقاطع سازه ای تنش بیش از حد مجاز نداشته باشند.

(۱۱) نتیجه دیگری که از کاربرد TMD در فعالیتهای هماهنگ بدست می آید این است که اگر سازه کف در فاز طراحی باشد آنگاه استفاده از روش سختی (تقویت اجزای سازه ای کف) نسبت به TMD برتری دارد. در نهایت اگر سازه کف قبلاً طراحی و اجرا گردیده باشد آنگاه در این نوع کف ها استفاده از TMD همراه با اندک تقویت سازه ای (بعثت افزایش جرم کف) می تواند گره گشای حل معضل ارتعاش نامطلوب باشد.

پیشنهادات:

در محدوده کاربرد TMD، سطوح ممکن تحقیقات آتی می تواند در زمینه های زیر باشد:

(۱) کاری که در این تحقیق صورت گرفت طراحی TMD برای حل مشکل یک مود بود لذا در پژوهشهای

آتی می توان برای چندین مود مشکل ساز، از یک TMD بهره جست .

(۲) در این تحقیق رفتار سازه و TMD در محدوده ارتجاعی- خطی بود. در تحقیق دیگری توان

رفتار غیر خطی سازه و TMD را مد نظر قرار داد.

(۳) در این تحقیق استفاده از TMD در مودهای قائم صورت گرفته است لذا جنبه دیگر تحقیق می

تواند کاربرد TMD در جهت جانبی (کنترل ارتعاش ناشی از باد و زلزله) باشد.

(۴) لازم است تحقیقات بیشتری در خصوص یکسان نبودن شتابهای بدست آمده از تحلیل دستی مطابق

راهنمای طراحی و مدل اجزای محدود صورت گیرد تا این مغایرتها در مدل سازی به روش اجزای محدود

برطرف شود.

(۵) همچنین می توان در تحقیقات آتی علاوه بر مدل سازی کف ها؛ وجود پارتیشن ها، سقف و کف کاذب

، دیوارهای داخلی و خارجی را در مدل سازی به روش اجزای محدود گنجانند.

(۶) در تحقیق دیگری توان روی تحلیل حساسیت TMD کار کرد و دامنه تغییرات بارهای دینامیکی

افراد را بررسی نمود تا محدوده کارآمدی TMD تعیین گردد (بویژه در فعالیتهای هماهنگ).

(۷) به عنوان مثال ،مدل کف مورد مطالعه می تواند کف کامپوزیت با ترکیبی از تیر ورق های باکسی

شکل و دال بتن آرمه باشد (مانند پل های جاده ها). زیرا در مدل اجزای محدود بعلاوه رفتار برشی و ارتفاع

زیاد مقاطع، دیگر المان تیری دقت لازم را ندارد و می بایست از المان های دیگر بهره گرفت.

۸) تحقیقات بیشتر در سطوح ارتعاشات کف می تواند تا جایی ادامه یابد که بتوان برای انواع کف ها در راهنمای طراحی با محاسبات دستی به تعیین پارامترهای ارتعاش پرداخت؛ چرا که بعلت پیچیدگی های این نوع کف ها دیگر نمی توان از محاسبات موجود در راهنمای طراحی استفاده کرد (مانند مورد قبلی).

ضمیمه الف

تعیین بار دینامیکی معادل جهت فعالیت راه رفتن

طبق راهنمای طراحی شتاب اوج کف بعثت راه رفتن با در نظر گرفتن میانگین وزن شخص در وسط کف در هماهنگی با فرکانس اساسی کف (حالت رزونانس) عبارت است از:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \exp(-0.35 f_n)}{\xi W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (\text{الف-۱})$$

تغییر مکان در حالت پاسخ پایدار تحت بار هارمونیک متمرکز در وسط کف $F(t) = \hat{p} \sin 2\pi f t$ برای سیستم یک درجه آزادی در وضعیت بحرانی (وسط کف) خواهد بود.

$$z = \frac{\hat{p}}{k} \frac{\sin(2\pi f t - \varphi)}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + (2\xi \frac{f}{f_n})^2}} \quad (\text{الف-۲})$$

در حالت رزونانس ($f = f_n$) پاسخ به شکل زیر خواهد بود.

$$z = \frac{\hat{p}}{k} \frac{\sin(2\pi f_n t - \varphi)}{2\xi} \quad (\text{الف-۳})$$

پس از دو بار مشتق گیری از رابطه الف-۲ معادله شتاب خواهد شد.

$$a = -\frac{\hat{p}}{k} (2\pi f_n)^2 \frac{\sin(2\pi f_n t - \varphi)}{2\xi} \quad (\text{الف-۴})$$

که در نتیجه رابطه شتاب اوج (پیک) نسبی (نسبت به شتاب جاذبه) خواهد بود.

$$\frac{a_p}{g} = -\frac{\hat{p}}{k} (2\pi f_n)^2 \frac{1}{2\xi g} \quad (\text{الف-۵})$$

از آنجایی که جرم تیر ساده با یک درجه آزادی مساوی ۵۰٪ جرم واقعی است لذا خواهیم داشت.

$$m = \frac{M}{2} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2k}{M}} \Rightarrow k = M\omega^2 / 2 \quad (\text{الف-۶})$$

با جایگذاری رابطه الف-۵ در رابطه الف-۴ خواهیم داشت.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{\hat{p}}{M \omega^2} (2 \pi f_n)^2 \frac{1}{2 \xi g} = \frac{\hat{p}}{\xi M g} \left(\frac{2 \pi}{\omega} \right)^2 (f_n)^2 = \frac{\hat{p}}{\xi W}$$

(الف-۷)

از تساوی رابطه الف-۶ با رابطه الف-۱ مقدار $\hat{p}$ برابر است با:

$$\hat{p} = p_0 \exp(-0.35 f_n) \quad (\text{الف-۸})$$

در نتیجه نیروی دینامیکی معادل برای راه رفتن شخص عبارت خواهد بود از:

$$F(t) = [p_0 \exp(-0.35 f_n)] \sin 2\pi f_n t \quad (\text{الف-۹})$$

یعنی کافیت تا این نیروی دینامیکی معادل آیین نامه ای در بحرانی ترمکان کف بصورت متمرکز وارد

شود تا شتاب حاصل از تحلیل دینامیکی بدست آید. و نتیجه با حد شتاب مطلوب مقایسه گردد.

ضمیمه ب

تعیین بار دینامیکی معادل جهت فعالیت‌های هماهنگ

طبق ضوابط راهنمای طراحی شتاب اوج ناشی از فعالیتهای هماهنگ به شرح زیر می باشد.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3 \alpha W_p / W_t}{\sqrt{[(\frac{f_n}{f})^2 - 1]^2 + (2\xi \frac{f_n}{f})^2}} \quad (\text{ب-۱})$$

حال فرض کنید که بار دینامیکی واحد سطح $F(t) = \hat{w} \sin 2\pi f t$ به کف بصورت گسترده وارد شود.

لذا تغییر مکان دینامیکی خواهد بود.

$$z = \frac{\hat{w}}{k} \frac{\sin(2\pi f t - \varphi)}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + (2\xi \frac{f}{f_n})^2}} \quad (\text{ب-۲})$$

شتاب نسبی پس ازدوبارمشتق گیری از رابطه ب-۲ بدست می آید. لذا داریم.

$$\frac{a}{g} = \frac{\hat{w}}{kg} (2\pi f)^2 \frac{\sin(2\pi f t - \varphi)}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + (2\xi \frac{f}{f_n})^2}} \quad (\text{ب-۳})$$

در نتیجه شتاب اوج پس از اعمال تبدیلاتی در رابطه ب-۳ به شکل زیر خواهد بود.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{\hat{w}}{kg} \frac{(2\pi f_n)^2}{\sqrt{[(\frac{f_n}{f})^2 - 1]^2 + (2\xi \frac{f_n}{f})^2}} \quad (\text{ب-۴})$$

از طرفی می دانیم که فرکانس اساسی کف بارگذاری شده تحت بار گسترده w_t بصورت رابطه

زیر می باشد.

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{gEI}{w_t L^4}} \quad (\text{ب-۵})$$

باجایگذاری رابطه ب-۵ در رابطه ب-۴ خواهیم داشت.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{\hat{w}}{kg} \frac{(2\pi)^2 (\pi^2 / 4) (gEI / w_t L^4)}{\sqrt{[(\frac{f_n}{f})^2 - 1]^2 + (2\xi \frac{f_n}{f})^2}} \quad (\text{ب-۶})$$

ازطرفی می دانیم که :

$$k = \frac{384EI}{5L^4} \quad (\text{ب-۷})$$

با جایگذاری رابطه ب-۷ در رابطه ب-۶ و پس از ساده کردن خواهیم داشت:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{\hat{w}}{(384 / 5)} \frac{(\pi^4) / w_t}{\sqrt{[(\frac{f_n}{f})^2 - 1]^2 + (2\xi \frac{f_n}{f})^2}} \quad (\text{ب-۸})$$

ازتساوی رابطه ب-۸ با رابطه ب-۱ خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \frac{a_p}{g} &= \frac{\hat{w} (\pi^4) / w_t}{(384 / 5)} = 1.3 \alpha w_p / w_t \\ \Rightarrow \hat{w} &= 1.025 \alpha w_p \Rightarrow \hat{w} \approx \alpha w_p \end{aligned} \quad (\text{ب-۹})$$

ضمیمه ج فهرست فایل‌های نرم افزار

SAP2000Ver.11.0.7

فایل‌های شرح داده شده زیر، در CD پیوست این پایان نامه موجود می باشد.

ج-۱: کف پل عابر پیاده در پوشه Bridge حاوی:

ج-۱-۱: فایل کنترل طراحی براساس معیار مقاومت و خیز: Bridge-s

ج-۱-۲: فایل کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی: Bridge-v

ج-۱-۳: فایل ارتعاش مطلوب با افزایش سختی: Bridge-k

ج-۱-۴: فایل ارتعاش مطلوب با نصب TMD: Bridge- T

ج-۲: کف اداره الکترونیکی در پوشه Office حاوی:

ج-۲-۱: فایل کنترل طراحی براساس معیار مقاومت و خیز: Office-s

ج-۲-۲: فایل کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی: Office -v

ج-۲-۳: فایل ارتعاش مطلوب با افزایش سختی: Office -k

ج-۲-۴: فایل ارتعاش مطلوب با نصب TMD: Office – T

ج-۳: کف سالن تمرین کشتی درپوشه Wrestling حاوی:

ج-۳-۱: فایل کنترل طراحی براساس معیار مقاومت وخیز: Wrestling-s

ج-۳-۲: فایل کنترل ارتعاش براساس راهنمای طراحی: Wrestling -v

ج-۳-۳: فایل ارتعاش مطلوب باافزایش سختی: Wrestling -k

ج-۳-۴: فایل ارتعاش مطلوب با نصب TMD: Wrestling - T

فهرست منابع

- [1] Willford M.R. and young p.,A Design Guide for Footfall induced vibration of Structures,The concrete center,2007
- [2] Michael J.Sladki,Dec.1999,"Prediction of floor vibration Response using the Finite Element Method",M.SC.Thesis,Virginia polytechnic Institute and state university,Blacksburg,virginia24061.
- [3] Murray,T.m.Allen,D.E.,Unger,E.E.(1997). "AISC Steel Design Guide Series 11:"Floor Vibration Due to Human Activity",American Institute of steel construction,Chicago,Illinois.
- [4] Delancey Boice,M.,Feb. 2003,"Study to improve the predicted response of floor systems due to walking",M.Sc. Thesis,Virginia polytechnic Institute and state university,blacksburge,24061.
- [5] Murray,T.m.,june 1991,"Building Floor Vibrations",T.R. Higgins Lectuship paper presented at the AISC National Steel Construction conference,Washington ,D.C.
- [6] Naeim Farzad,sep. 1991."Design practice to prevent floor vibrations",steel tips.
- [7] Saidi,I. and et al,2006,"Floor vibration due to human excitation-damping perspective",Earthquake Engineering in Australia,pp. 257-264
- [8] Weber F.,and et al,March2006,"Guidelines for Structural control", Engineering Research Laboratory",dubendorf,switzerland,(WWW.SAMCO.ORG).

- [9] GERB vibration control systems co.,Ltd,Schwingsisolierungen GmbH&Co.KG,WWW.gerb.com.
- [10] MAURER SOHNE INC.since 1876,"Thechnical information and prduct",Munchen/Germany.
- [11] Hoi koo,j.,july2003,"using Magneto-Rheological Dampers in semiactive tuned vibration Absorbers to control structural vibrations",PhD Thesis,virginia polytechnic Institute and state university
- [12] Anthony ,Ng, Aug 2005,"Floor Vibration in composite steel office Building" ,ASI journal –steel construction,vol 33,No.1.
- [13] Wilson,E.L.,and Habibullah,2007,SAP2000 Ver. 11.0.7,A Series of computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures, Structural Analysis user's Manual,computers and structures,Inc,Berckley,california.
- [14] Allen,D.E., "Floor vibration from Aerobics",canadian journal of civil Engineering,vol,17,No.5,October 1990.
- [15] J.J. connor,"Introduction to structural motion control(1st ed.)",Prentice Hall,2003
- [16] Denhartog,J.P.,1956,Mechanical vibrations,McGraw-Hillbook company,Inc:Newyork.
- [17] Clough,R.W.and J.Penzien,"Dynamics of structures ",(3rd ed.),computers&structures,Inc.,2003.

[18] Tsai,H.C.and Lin,G.C.,1993,"Optimum Tuned mass dampers for minimizing steady state response of support –excited and damped systems",Earthquake Engineering and Stuctural Dynamics,22,pp 957-973.

[19] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان-طرح و اجرای ساختمانهای فولادی-وزارت مسکن

وشهرسازی-دفترترویج مقررات ملی ساختمان-تهران ۱۳۸۴

[20] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان-بارهای وارد بر ساختمان-وزارت مسکن وشهرسازی-

دفترترویج مقررات ملی ساختمان-تهران ۱۳۸۰

[21] Setareh,M.and Hanson,R.D.,(1992a),"Tuned Mass Damers for Balcony vibration control.",Journal of structural engineering,ASCE,118(3),723-740.

[22] Hewitt C.M. and Murray,T.M.,April 2004,"Office fit-out and Floor vibrations",Modern Steel Construction.

[23] Vallenilla,C.R.and Bjorhovde R., "Effective Width criteria for composite Beams",Engineering journal/American Institute of steel construction,pp 169-175

Also, finite element analysis indicate that the hand calculation according to AISC Design Guide 11 is accurate for fundamental frequency. However, there is an error in predicting peak accelerations which should be taken into account.

Keywords:

Tuned mass dampers(TMD), floor vibrations, composite floors, fundamental frequency

Peak acceleration, modal analysis, time history analysis(THA)

Abstract:

In building construction , a growing demand exist for open floor spaces(i.e.,using less column and less wall partitions). At the same time, more light weight structural materials with increased strength are available. Using these new materials with open floor spaces induces excessive vibrations due to human activities (walking , aerobics, etc.).

In these research ,vibration control of non industrial composite floors due to human activities is discussed. One control method for reduction floor vibrations is based on tuned mass dampers(TMD). In these research at first mathematical theory for multi degree of freedom floor systems equipped with TMD is presented. Next, optimum design parameters are presented in the form of appropriate equations and graphs.

For modeling of TMD and composite floors, SAP2000 finite element program is utilized and modal and time history dynamic analysis is performed and key technics of modeling have been presented.

Performance of TMD is evaluated by numerical simulations of a footbridge and an electronic office (an office mainly based on computers rather than traditional filling systems). Results implicate that more than fifty percent reduction at floor peak acceleration is achieved by using TMD.

In another example, application of TMD for vibration reduction in floors of a multi-story sport and wrestling complex is studied. Results indicate that while TMD can reduce the vibrations but the cost is a concern. Accordingly,TMD can be used for improvement of the existing floors.



Shahrood University of Technology

Faculty of civil and architectural

**The use of tuned mass dampers to control floor vibration of
non industrial buildings**

Supervisors:

Dr. Ali keyhani

Dr. vahidreza kalatjari

Gholamhosein khajavi fakhredavoud

Date: july 2009