

بررسی تأثیر گام بسامدی در میرایی مودی شناسایی شده در یک شبکه‌ی دولایه

سجاد صالحی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سیدامین مصطفویان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران

محمدرضا داودی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دربی ۲ - ۳۷، شماره ۱/۱، ص. ۱۱۵-۱۰۵

دو خطای آریبی و تصادفی در برآورد میرایی سازه‌ها از طریق روش‌های حوزه‌ی بسامد حائز اهمیت هستند و انتخاب گام بسامدی مناسب می‌تواند به کاهش آنها بیانجامد. در پژوهش حاضر، گام بسامدی که کمترین خطای آریبی و تصادفی را برای تعیین میرایی مودی به دست می‌دهد، تعیین شده است. بدین منظور، میرایی ۶ مود اول یک شبکه‌ی دولایه‌ی ساخته شده با سیستم پیونده‌ی گویسان از طریق روش‌های شناسایی خروجی - تنها تجزیه در حوزه‌ی بسامد ارتقاء یافته (EFDD) و تجزیه در حوزه‌ی بسامد با برازش منحنی (CFDD) و با گام‌های بسامدی مختلف برآورد شده است. مقادیر میرایی به دست آمده از روش‌های مذکور با روش شناسایی ورودی - خروجی حوزه‌ی زمان ابراهیم (ITD)، به عنوان میرایی مبنا مقایسه شده است. نتایج میرایی‌های به دست آمده از روش‌های حوزه‌ی بسامد EFDD و CFDD نشان داده است که میان میرایی و گام بسامدی در هر مود، رابطه‌ی تقریباً خطی برقرار است. روش‌های حوزه‌ی بسامد در گام بسامدی ۰/۰۶۲۵ هرتز در بیشتر مودها، کمترین اختلاف نسبی را با میرایی مبنا به میزان صفر تا ۲۱/۴۳٪ نشان دادند.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی دولایه، میرایی، روش شناسایی خروجی - تنها، گام بسامدی، روش‌های حوزه‌ی بسامد، خطای آریبی، خطای تصادفی.

sajjad.salehi.66@gmail.com
amin.mostafavian@gmail.com
davoodi@nit.ac.ir

۱. مقدمه

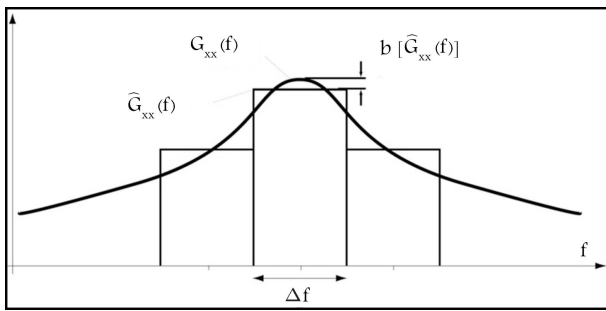
شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار، سیستم‌های پیش‌ساخته‌ی خاصی متشکل از دو شبکه‌ی موازی بالایی و پایینی هستند، که اتصال دو شبکه‌ی مذکور توسط اعضاء قائم و یا مورب جان در شکل‌های مختلف انجام می‌پذیرد. سازه‌های ذکر شده عمدتاً به صورت پیش‌ساخته در کارخانه تولید و در محل، مونتاژ و نصب می‌شوند و به دلیل مرایایی، مانند: سهولت و سرعت اجرا، وزن کم، سختی مناسب و قابلیت تعویض اعضا برای اجرای سقف در دهانه‌های بزرگ استفاده می‌شوند.^[۱] با وجود آن‌که در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های دولایه به طرز چشمگیری افزایش یافته است، اما همچنان مطالعات کافی درباره‌ی بررسی رفتار دینامیکی‌شان صورت پذیرفته است. با وجود این‌که در مورد تعیین بسامدهای طبیعی شبکه‌های دولایه با سیستم پیونده‌ی گویسان مطالعاتی انجام گرفته است،^[۲] اما به دلیل پیچیدگی نوع خاص پیونده در سازه‌ی ذکر شده، مطالعات بسیار کمی در مورد تعیین میرایی شبکه‌های دولایه با سیستم پیونده‌ی گویسان انجام شده است.^[۳] پیچیدگی رفتار پیونده‌ی گویسان به

دلایل وجود مصالح مختلف در آن، حضور پیچ و نیروهای پیش‌تیدگی، رواداری‌های ساخت، وجود ناپوستگی‌ها و فاصله‌ی آزاد بین قطعات است.^[۴] تعیین تجربی نسبت‌های مودال ورودی - خروجی و خروجی - تنها^۱ انجام می‌شود. در روش شناسایی مودال ورودی - خروجی، نسبت‌های میرایی بر اساس اطلاعاتی که توأمان از ورودی (تحریک) و خروجی (پاسخ) سازه دریافت می‌شود، تعیین می‌شوند.^[۵] حال آن‌که در روش شناسایی مودال خروجی - تنها، نسبت‌های میرایی بر اساس اطلاعاتی که فقط از خروجی سازه دریافت می‌شود، شناسایی می‌شوند.^[۶] از آنجایی که روش شناسایی مودال ورودی - خروجی عمدتاً در محیط آزمایشگاه و برای سازه‌های کوچک قابل کنترل، کاربرد دارد،^[۷] بنابراین در سازه‌های واقعی با ابعاد بزرگ، مانند: شبکه‌های دولایه، تعیین پارامترهای مودال سازه‌ی از جمله میرایی، ناچاراً از روش تحلیل مودال خروجی - تنها انجام می‌گیرد.^[۸] مراجع متعددی در زمینه‌ی برآورد میرایی از روش تحلیل مودال خروجی - تنها وجود دارد. در بعضی از مراجع،^[۹] نشان داده شده است که در روش‌های خروجی - تنها، پراکنندگی بیشتری در برآوردهای میرایی نسبت به شکل مود و بسامد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۲/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۱/۴/۱۳۹۹، پذیرش ۳۱/۴/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55665.2772



شکل ۱. خطای آریبی در تخمین PSD. [۲۳]

ثابت و تکرارپذیری (۲) خطاهای تصادفی: خطاهای تکرارنشده و غیردائمی. [۲۳]

۱.۲. خطای آریبی در برآورد میرایی

جهت تخمین پارامتر میرایی در روش‌های حوزه بسامد از تابع PSD استفاده می‌شود، که از محاسبه تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی مطابق رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$G_{xx}(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

که در آن، G_{xx} و R_{xx} به ترتیب توابع PSD و خودهمبستگی هستند و f متغیر بسامد است. هنگامی که توابع PSD به صورت تجربی محاسبه می‌شوند، توابع پیوسته مذکور مطابق شکل ۱، با تعدادی ستون‌های میله‌ای تقریب زده می‌شوند. در شکل ۱، مقدار واقعی با G_{xx} و مقدار تقریب زده شده با \hat{G}_{xx} نمایش داده شده است. تقریب‌های ذکر شده منجر به خطای آریبی می‌شوند، که در شکل ۱ با $b[\hat{G}_{xx}(f)]$ نشان داده شده است. با کاهش عرض ستون‌های میله‌ای Δf در شکل (۱)، خطای آریبی نیز کاهش می‌یابد (Δf همان گام بسامدی است).

مطابق شکل ۱، به طور کاملاً واضحی مشاهده می‌شود که جهت برآورد قله‌های تیزتر، هر چه Δf بزرگ‌تر باشد، منجر به خطای آریبی بزرگ‌تری می‌شود. به منظور برآورد قله‌های ذکر شده، نیاز به Δf های بسیار کوچک است، که منجر به کاهش خطای آریبی شود.

خطای آریبی برابر با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده از یک پارامتر منهای مقدار اصلی آن پارامتر، مطابق رابطه ۲ است:

$$b[\hat{G}_{xx}(f)] = E[\hat{G}_{xx}(f)] - G_{xx}(f) \quad (2)$$

که در آن، میانگین مقادیر $\hat{G}_{xx}(f)$ در بازه Δf یعنی $E[\hat{G}_{xx}(f)]$ از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$E[\hat{G}_{xx}(f)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{G}_{xx}(f)_i \quad (3)$$

معمولاً خطای یک برآورد به صورت نسبی و با عبارت کسری تقسیم مقدار مطلق آن خطا بر مقدار واقعی پارامتر بیان شده است، که خطای نرمال نامیده می‌شود. مقدار خطای نرمال آریبی ε_b مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_b = \frac{b[\hat{G}_{xx}(f)]}{G_{xx}(f)} \quad (4)$$

طبیعی وجود دارد. در برخی مراجع دیگر، [۱۸-۱۴] نشان داده شده است که اختلاف میان نتایج میرایی برآورد شده به کمک روش‌های مختلف شناسایی خروجی - تنها قابل ملاحظه است. در بعضی از مراجع، [۱۹ و ۲۰] برآوردهای میرایی به کمک روش‌های خروجی - تنها اغلب غیردقیق تلقی می‌شود. مطابق برخی مراجع دیگر، [۲۱ و ۲۲] محدوده‌ی خطای میرایی در برآوردهای تجربی می‌تواند مقداری بزرگ باشد.

در تحلیل خروجی - تنها، دو روش پرکاربرد که برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده می‌شود، روش‌های تجزیه در حوزه بسامدی ارتقاء یافته (EFDD) [۲] و تجزیه در حوزه بسامدی با برازش منحنی (CFDD) [۳] هستند. به دلیل این‌که شناسایی سازه‌ی در دو روش ذکر شده حوزه بسامد، بر اساس تحلیل طیفی داده‌های پاسخ انجام می‌شود، [۲۳] تخمین‌های میرایی به کمک آنها تحت تأثیر دو خطای آریبی [۲۴ و ۲۵] و تصادفی [۲۶] هستند. یک خطای سیستماتیک است، که ثابت و تکرارپذیر است؛ در حالی که خطای تصادفی، تکرارنشده و غیردائمی است و در اثر پراکندگی داده‌ها ایجاد می‌شود. [۲۶] برای کاهش خطای آریبی در تحلیل‌های طیفی، از گام بسامدی مناسب، یعنی به اندازه‌ی کافی کوچک، استفاده می‌شود. [۲۷ و ۲۸] برای کاهش خطای تصادفی و در نتیجه داشتن تخمین مناسبی از طیف پاسخ، به مقدار بالایی از میانگین‌گیری یا برهم نهی نیاز است. [۲۹] برای این منظور، باید مدت زمان ثبت داده‌ها به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد [۳۰] و با گام بسامدی، به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب شود تا تعداد میانگین‌گیری افزایش یابد. نهایتاً برای داشتن تخمین قابل اطمینانی از میرایی، باید تعداد مناسبی از میانگین‌گیری به همراه عدد مناسبی از گام بسامدی در نظر گرفته شود. [۳۱]

کوچک در نظر گرفتن گام بسامدی منجر به کاهش خطای آریبی و افزایش خطای تصادفی می‌شود و برعکس، انتخاب عدد بزرگی برای گام بسامدی به افزایش خطای آریبی و کاهش خطای تصادفی می‌انجامد. [۳۲] بنابراین باید یک گام بسامدی مناسبی وجود داشته باشد، که مجموع دو خطای آریبی و تصادفی را به میزان کمینه برساند.

نظر به پیچیدگی پدیده‌ی میرایی و نیز ضرورت تعیین میرایی برای مطالعه‌ی رفتار دینامیکی، در پژوهش حاضر میرایی‌های مودی یک شبکه‌ی دولایه دارای پیوندهای گویسان با تعیین یک گام بسامدی مناسب، به نحوی شناسایی شده است که مجموع خطاهای آریبی و تصادفی در روش‌های حوزه بسامد، کمینه‌ی ممکن باشند. بدین منظور یک شبکه‌ی دولایه با سیستم پیوندهای گویسان در آزمایشگاه ساخته شد و با انجام آزمایش مودال خروجی - تنها، نسبت‌های میرایی مودی مربوط به چند مود اول سازه‌ی ذکر شده (مودهای با بسامد طبیعی زیر ۱۰۰ هرتز) تعیین شدند. روش‌های شناسایی خروجی - تنها استفاده شده شامل EFDD و CFDD است. سپس با انجام آزمایش مودال ورودی - خروجی، همان نسبت‌های میرایی از روش شناسایی ورودی - خروجی حوزه زمان ابراهیم (ITD) [۶] اندازه‌گیری شدند. در ادامه، مقادیر نسبت‌های میرایی به دست آمده از روش شناسایی خروجی - تنها با گام‌های مختلف بسامدی با مقادیر متناظر به دست آمده از روش شناسایی ورودی - خروجی به عنوان مقادیر مبنا مقایسه و در نهایت، یک گام بسامدی مناسب جهت تخمین میرایی برای شبکه‌ی دولایه‌ی مذکور تعیین شده است.

۲. تخمین میرایی و خطای آن در روش‌های حوزه‌ی بسامد

معمولاً در تعیین تابع چگالی طیفی توان (PSD) [۷] جهت تخمین پارامترهای دینامیکی سازه، دو دسته خطا اتفاق می‌افتد: (۱) خطاهای سیستماتیک (آریبی): خطاهای

نک مقادیر $\hat{D}_{xx}(f)$ است. مقدار واریانس برآورد $\hat{G}_{xx}(f)$ مطابق رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.^[۲۲]

$$\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)] = E \left[\left(\hat{G}_{xx}(f) - E [\hat{G}_{xx}(f)] \right)^2 \right] = E [\hat{G}_{xx}(f)^2] - E^2 [\hat{G}_{xx}(f)] \quad (11)$$

خطای تصادفی برابر انحراف استاندارد مقادیر برآورد است، که با علامت σ نشان داده می‌شود، که همان جذر واریانس داده‌هاست، که مطابق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\sigma [\hat{G}_{xx}(f)] = \sqrt{\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)]} = \sqrt{E [\hat{G}_{xx}(f)^2] - E^2 [\hat{G}_{xx}(f)]} \quad (12)$$

برندت و همکاران (۲۰۰۲)،^[۲۷] برای تخمین خطای تصادفی در برآورد PSD، عبارت $\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)]$ را به صورت رابطه تقریبی ۱۳ بیان کردند:

$$\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)] \approx \frac{G_{xx}^2(f)}{T_t B_e} \quad (13)$$

که در آن، T_t برابر طول کل رکورد و B_e همان گام بسامدی است. همچنین مربع خطای نرمال تصادفی (ε_r^2) از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_r^2 \approx \frac{\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)]}{G_{xx}(f)^2} \approx \frac{1}{T_t B_e} \quad (14)$$

در عمل، کل زمان اندازه‌گیری T_t ، مطابق رابطه ۱۵ به n_d زیربخش با مدت زمان T تقسیم می‌شود. نمودار PSD با محاسبه تعداد n_d برآورد با طول زمان T و میانگین‌گیری از نتایج حاصل جهت یک برآورد دقیق به دست می‌آید. این نتایج ممکن است با تقسیم یک رکورد طولانی به n_d قسمت با مدت زمان T اتفاق بیافتد و یا ممکن است با تکرار یک آزمایش به تعداد n_d بار در شرایط مشابه رخ دهد. در واقع، تعداد n_d نشان‌دهنده میانگین رکوردهای مختلف در هر بازه زمانی است.^[۲۳]

$$T_t = n_d \cdot T \quad (15)$$

با توجه به تعریف B_e و رابطه گام بسامدی Δf با مدت زمان T ، معادله ۱۴ به صورت معادله ۱۶ بازنویسی می‌شود:

$$\varepsilon_r^2 = \frac{1}{n_d} \quad (16)$$

مطابق رابطه ۱۶ به دست آمده می‌توان بیان کرد که مقدار خطای تصادفی، به تعداد میانگین n_d وابسته است. با توجه به روابط ۱۵ و ۱۶ می‌توان بیان کرد که با ثابت بودن T_t ، برای کاهش خطای تصادفی باید تعداد n_d ها به اندازه کافی بزرگ باشد. همچنین جهت کاهش خطای آریبی، با توجه به روابط ۸ و ۱۵، مدت زمان T باید به اندازه‌ی ممکن بزرگ باشد. همچنین مطابق روابط ۸ و ۱۶ می‌توان گفت که با ثابت بودن T_t ، مقادیر خطای آریبی و تصادفی به صورت عکس یکدیگر تغییر می‌کنند؛ زیرا با افزایش تعداد n_d ، مقدار خطای تصادفی، کاهش می‌یابد؛ اما در مقابل با توجه به رابطه ۱۵، مقدار T کاهش و در نتیجه، گام بسامدی و خطای آریبی افزایش می‌یابند.

بندها^۸ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۲۳] با تعریف B_e به عنوان گام بسامدی (که همان Δf است)، تقریبی از خطای آریبی را مطابق رابطه ۵ ارائه کردند:

$$b [\hat{G}_{xx}(f)] \approx \frac{B_e^2}{24} \ddot{G}_{xx}(f) \quad (5)$$

که در آن، $\ddot{G}_{xx}(f)$ مشتق دوم تابع G_{xx} نسبت به متغیر بسامد است و از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$\ddot{G}_{xx}(f) = -\lambda \pi^2 \int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 R_{xx}(\tau) e^{-j\tau f} d\tau \approx \left(-\frac{\lambda}{B_r^2} \right) G_{xx}(f) \quad (6)$$

که در آن، B_r پهنای باند روش نیم - توان است. به کمک دو رابطه ۵ و ۶، خطای نرمال آریبی مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_b = \frac{b [\hat{G}_{xx}(f)]}{G_{xx}(f)} = -\frac{1}{3} \left(\frac{B_e}{B_r} \right)^2 \quad (7)$$

همان طور که اشاره شد، در رابطه ۷، B_e برابر Δf و B_r ، همان $2\xi_n \omega_n$ (پهنای باند روش نیم - توان) است که در آن ξ_n و ω_n به ترتیب میرایی و بسامد زاویه‌ی مود n ام هستند. در نتیجه، قدرمطلق رابطه ۷ به فرم معادله ۸ بازنویسی می‌شود:^[۲۳]

$$|\varepsilon_b| = \frac{1}{3} \left(\frac{B_e}{B_r} \right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta f}{2\xi_n \omega_n} \right)^2 \quad (8)$$

همچنین برندت^۹ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۲۴] بیان داشتند هرگاه مدت زمان ثبت داده به اندازه‌ی کافی باشد، در نظر گرفتن خطای آریبی حدود ۲٪، معمول است. بنابراین در رابطه ۸ با در نظر گرفتن $|\varepsilon_b| \approx 2\%$ و با توجه به این‌که $\omega_n = 2\pi f_n$ در آن f_n بسامد طبیعی مود n ام است، اندازه‌ی میرایی مطابق رابطه تقریبی ۹ محاسبه می‌شود:

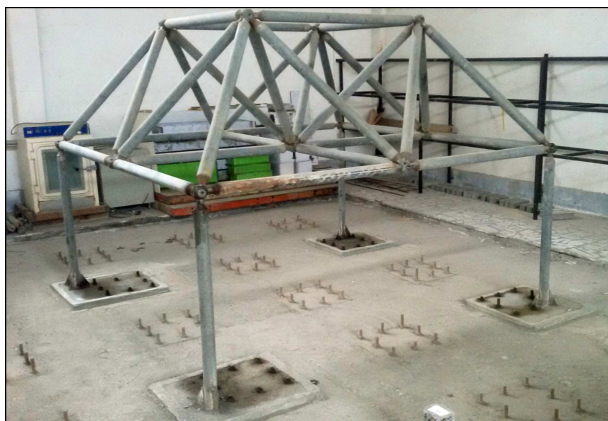
$$\xi_b \approx \frac{\Delta f}{\pi f_n} = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta f}{f_n} \quad (9)$$

همان طور که در رابطه ۹ مشاهده می‌شود، مقدار میرایی در معادله‌ی اخیر (ξ_b)، میرایی با لحاظ کردن خطای آریبی حدود ۲٪ در برآورد PSD است، که با میرایی آریبی شناخته می‌شود.^[۲۴] همچنین مشاهده می‌شود که با بزرگ‌تر شدن گام بسامدی، مطابق رابطه ۹، اندازه‌ی میرایی بزرگ‌تر می‌شود. از آن‌جا که مطابق رابطه ناپکوئیست - شانون^{۱۰}،^[۲۵] گام بسامدی Δf با مدت زمان T رابطه عکس دارد رابطه ۱۰، نتیجه‌گیری اخیر با کوچک شدن زمان T نیز برقرار است. بنابراین در مرحله‌ی انجام تبدیلات فوریه، از تعداد غیرصحیحی از دوره‌های تناوب، یک سیگنال تبدیل فوریه گرفته می‌شود، که منجر به خطای آریبی بیشتری ناشی از نشت می‌شود.^[۲۶] در نتیجه، قله‌های طیف PSD به همان اندازه‌ی واقعی خودشان تعیین نمی‌شوند.

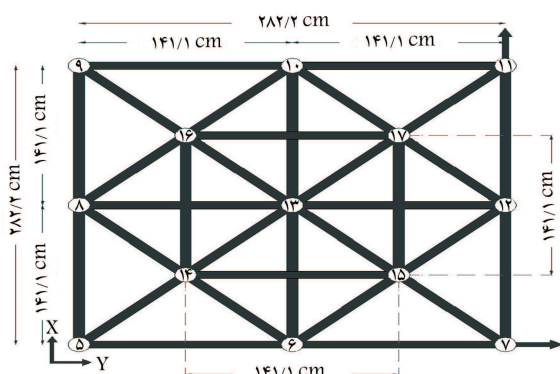
$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

۲.۲. خطای تصادفی در برآورد میرایی

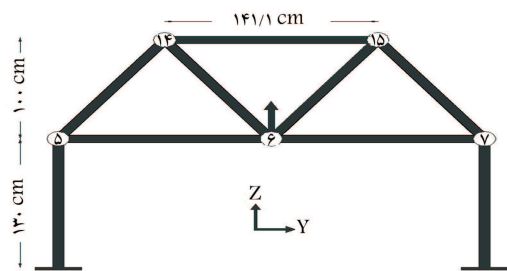
واریانس مقادیر $\hat{G}_{xx}(f)$ ، با عبارت $\text{Var} [\hat{G}_{xx}(f)]$ نشان داده می‌شود، که طبق تعریف، مقدار آن برابر با میانگین مربع تفاوت میان میانگین مقادیر $\hat{G}_{xx}(f)$ از تک



شکل ۲. شبکه‌ی دولایه‌ی بررسی شده.



الف) پلان؛



ب) نمای جانبی شبکه دو لایه مطالعه شده.

شکل ۳. پلان و نمای جانبی شبکه دو لایه مورد مطالعه (پیکان‌ها نمایان‌گر شتاب‌سنج‌های مرجع هستند).



شکل ۴. یک نمونه پیونده‌ی گویسان در شبکه‌ی دولایه‌ی مورد مطالعه.

مطابق روابط ارائه شده می‌توان گفت که با انتخاب یک گام بسامدی مناسب، مجموع خطاهای ذکر شده کمینه می‌شوند. بنابراین در پژوهش حاضر، میرایی سازی مورد مطالعه با استفاده از روش‌های حوزه‌ی بسامد EFDD و CFDD، با گام‌های بسامدی مختلف تخمین زده شده است. سپس با انتخاب یک مبنای مناسب جهت مقایسه، گام بسامدی مناسب جهت کمینه‌سازی خطاها تعیین شده است.

۳. مدل فیزیکی شبکه‌ی دولایه

مطابق شکل ۲، یک شبکه‌ی دولایه با سیستم پیونده‌ی گویسان با دو دهانه در دو دهانه در آزمایشگاه ساخته شد. شبکه‌ی دولایه‌ی ذکر شده در چهار گوشه بر روی ۴ لوله‌ی فولادی به عنوان تکیه‌گاه قرار گرفت. پلان و نمای جانبی مدل شبکه‌ی اخیر در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. شبکه‌ی دولایه‌ی مذکور، ۳۲ جزء قابی و ۱۳ گوی پیش‌ساخته دارد، که همگی مشابه هستند. اجزاء قابی در وسط، شامل یک لوله‌ی میانی به طول، قطر و ضخامت جداره‌ی اسمی به ترتیب ۱۲۰، ۷٫۶۴ و ۰٫۳۵ سانتی‌متر و در دو انتها دارای اجزاء اتصال‌دهنده شامل قطعه‌ی مخروطی انتهایی، پیچ و غلاف هستند. وزن تقریبی سازه، ۳۶۰ کیلوگرم و ارتفاع کلی آن شامل ارتفاع ستون (۱٫۳ متر) و فاصله‌ی بین دولایه (۱ متر) بوده است، که در مجموع برابر ۲٫۳ متر است. همان‌طوری که اشاره شد، پیونده‌ی شبکه‌ی اخیر از نوع گویسان است، که در شکل ۴، یک نمونه از آن نشان داده شده است. همچنین قابل ذکر است، برای اتصال اجزاء شبکه تا قبل از مونتاژ تمامی اعضا، کلیه‌ی پیچ‌ها در حالت شل بوده و پس از آن طی دو مرحله، پیچ‌ها تا حد امکان سفت شده‌اند.

۴. آزمایش مودال خروجی - تنها

جهت انجام آزمایش مودال خروجی - تنها، از یک تحلیل‌گر طیفی ۴ کاناله مربوط به شرکت B&K مدل PULSE۳۵۶۰C استفاده شده است. مطابق توصیه‌ی برینکر و ونچورا^[۲۸]، (۲۰۱۵)، برای یک سازه‌ی سه‌بعدی، دست‌کم سه شتاب‌سنج مرجع، که هرکدام در یکی از جهات دستگاه مختصات کارترین قرار می‌گیرند، مورد نیاز است. موقعیت سه شتاب‌سنج اخیر، که در تمام اندازه‌گیری‌ها ثابت نگه داشته می‌شود، به کمک نتایج تحلیلی اولیه تعیین شد، به نحوی که موقعیت‌های مذکور بیشترین میانگین شتاب مودی را برای مودهای مدنظر یعنی مودهای با بسامد طبیعی زیر ۱۰۰ هرتز داشتند. قرارداد شماره‌گذاری گره‌های شبکه‌ی اشاره شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، جهت و محل قرارگیری شتاب‌سنج‌های مرجع در گره‌های ۱۱، ۷ و ۶ و به ترتیب در جهات X، Y و Z است. با توجه به این‌که تعداد درجه‌های آزادی شبکه ۳۹ از تعداد کانال‌های دستگاه ۴ بیشتر است، بنابراین چاره‌ی جز چیش نوبتی شتاب‌سنج چهارم در نقاط مختلف شبکه وجود نداشته است، که به صورت متحرک بر روی گره‌های سازه (گوی‌ها) و در هر یک از جهات دستگاه مختصات کارترین به نوبت جابه‌جا شده است. بدین ترتیب در مجموع ۳۶ اندازه‌گیری انجام شد.

مدت زمان هر اندازه‌گیری پاسخ بر اساس رابطه‌ی پیشنهادی برینکر و ونچورا^[۲۸] (۲۰۱۵) و اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های اولیه، برابر ۳۶۰ ثانیه ($T_t = 360 \text{ Sec}$) انتخاب شد. تحریک سازه توسط ضربه‌های متوالی به سازه در طول زمان اندازه‌گیری پاسخ بوده است. ضربه‌های اخیر به گره‌های مختلف و در جهات مختلف به صورت کاملاً تصادفی به سازه اعمال شد. گام زمانی اندازه‌گیری

جدول ۱. مقادیر گام بسامدی Δf مدت زمان T در نظر گرفته شده است.

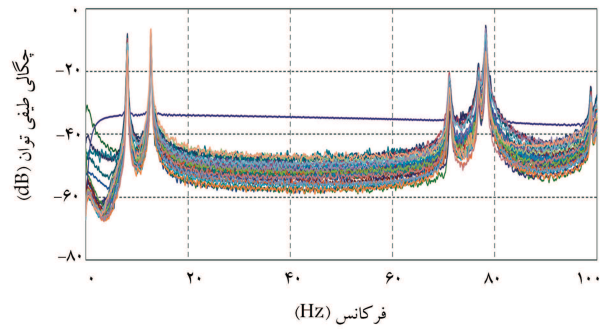
Δf (هرتز)	$T = \frac{1}{\Delta f}$ (ثانیه)
۰٫۲۵۰۰	۴
۰٫۱۲۵۰	۸
۰٫۰۶۲۵	۱۶
۰٫۰۳۱۳	۳۲
۰٫۰۱۵۶	۶۴
۰٫۰۰۷۸	۱۲۸

میان، مقدار بیشینه دارند. بسیاری از توابع توزیع احتمال رایج، از نوع بل هستند. توابع گوسی و توزیع احتمال کوشی، نمونه‌هایی از توابع بل هستند که کاهش مقدار واریانس، آنها را به توزیع دلتای دایرک نزدیک می‌سازد. تابع چگالی طیف توان یک درجه‌ی آزادی شناسایی شده در حوالی قله‌ی رزونانس، با استفاده از تبدیل فوریه‌ی گسسته‌ی معکوس به حوزه‌ی زمان بازگردانده می‌شود. بسامد طبیعی از طریق تعیین زمان‌های گذر از صفر و میرایی به وسیله‌ی کاهش لگاریتمی تابع خودهمبستگی نرمال شده‌ی سیستم یک درجه‌ی آزادی مرتبط به دست می‌آید.^[۲۱]

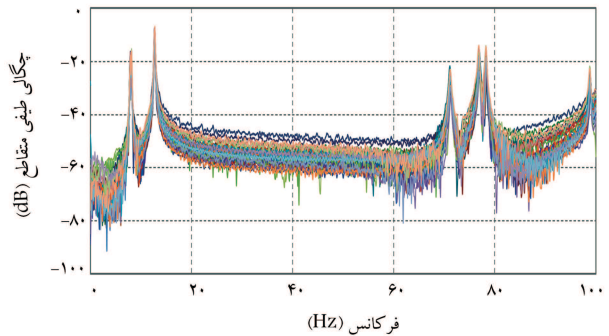
- روش تجزیه در حوزه‌ی بسامدی با برازش منحنی: در روش مذکور، توابع طیفی یک درجه‌ی آزادی بل تشکیل می‌شوند. با برازش توابع طیفی بل یک درجه‌ی آزادی، به کمک تخمین کمیته‌ی مربعات حوزه‌ی بسامد، بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی هر مود تعیین می‌شود. با توجه به این‌که که توابع طیفی یک درجه‌ی آزادی تشکیل شده مستقل از تأثیر مودهای دیگر هستند، بنابراین فقط یک مقدار ویژه برای برازش وجود دارد و بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی از مقادیر ویژه‌ی اشاره شده استخراج می‌شوند. از مزایای روش تجزیه در حوزه‌ی بسامد با برازش منحنی، تخمین دقیق بسامد طبیعی و نسبت میرایی به ویژه در صورت تحریک هارمونیک است. شکل‌های مودی در روش اخیر نیز دقیقاً مشابه روش EFDD محاسبه می‌شود.^[۲۲]

همان‌طور که اشاره شد، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که تأثیر بسیاری در شناسایی پارامترهای مودال و به خصوص میرایی، از روش‌های حوزه‌ی بسامد خروجی - تنها دارد، گام بسامدی است. در پژوهش حاضر، مقادیر بسامدها و میرایی‌های مودی با انتخاب گام‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار ARTeMIS Modal^[۲۳] تخمین زده شده و همچنین، محدوده‌ی وسیعی از گام‌های بسامدی در نظر گرفته شده است. مقادیر گام‌های در نظر گرفته شده به همراه مقادیر متناظر مدت زمان T در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

نتایج بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی از دو روش EFDD و CFDD به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. از آن‌جا که با تغییر گام بسامدی، تغییرات محسوس‌تری در مقادیر بسامدی‌های طبیعی رخ نداده است، نتایج آنها در جدول‌های مذکور، در همه‌ی گام‌ها ثابت بوده و فقط نتایج میرایی، در گام‌های مختلف گزارش شده است. بسامد طبیعی مودهای ۱ و ۲ و نیز مودهای ۵ و ۶ بسیار نزدیک هستند، که نشان‌گر وجود مودهای با فاصله‌ی کم یا مودهای زوج (از ویژگی‌های سازه‌های متقارن) در سازه است. با وجود این‌که شناسایی چنین مودهایی معمولاً مشکل است، اما روش‌های EFDD و CFDD به خوبی توانستند آنها را شناسایی کنند. همچنین مقایسه‌ی نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از دو روش اخیر نشان می‌دهد عملاً اختلافی میان نتایج آنها وجود ندارد. مطابق نتایج جدول‌های



الف) توابع PSD حاصل مربوط به شتاب سنج مرجع در گره ۷؛



ب) توابع CSD حاصل میان شتاب سنج‌های مرجع در گره ۷ و ۱۱.

شکل ۵. توابع چگالی طیفی توان و متقاطع، مربوط به شتاب سنج‌های مرجع نصب شده در شبکه دولایه.

پاسخ 0.0195 ثانیه و معادل بسامد نمونه‌برداری 512 هرتز با بسامد نایکویست 256 هرتز بوده است، که خیلی بزرگ‌تر از بیشترین بسامد طبیعی مد نظر سازه، یعنی 100 هرتز است.

به عنوان نمونه، در شکل ۵ - الف، نمودار PSD همه‌ی 36 اندازه‌گیری برای شتاب‌سنج مرجع در گره‌ی ۷ و در شکل ۵ - ب، نمودار چگالی طیفی متقاطع (CSD) مربوط به شتاب‌سنج‌های مرجع در گره‌های ۷ و ۱۱ ارائه شده است. مطابق نمودارهای اشاره شده، در همه‌ی اندازه‌گیری‌ها، محل قله‌ها تغییری نداشته است، که نشان‌دهنده‌ی محل بسامدهای طبیعی سازه است.

۵. تحلیل مودال خروجی - تنها

به منظور استخراج پارامترهای مودال در روش شناسایی خروجی - تنها، از روش‌های EFDD و CFDD استفاده شده است، که خلاصه‌ی از مبانی هر یک از دو روش مذکور در ادامه ارائه شده است:

- روش تجزیه در حوزه‌ی بسامدی ارتقاء یافته: روش ذکر شده در مقایسه با روش تجزیه در حوزه‌ی بسامدی (FDD)^[۲۴، ۲۵] با افزایش یک لایه‌ی برآورد مودال، دقت تخمین بسامدهای طبیعی و شکل مودها را ارتقاء می‌دهد و امکان تخمین میرایی را نیز ایجاد می‌کند. برآورد مودال در روش تجزیه در حوزه‌ی بسامدی ارتقاء یافته، شامل دو گام است: در گام اول، قله‌ها مشابه روش FDD انتخاب می‌شوند و در گام دوم، با استفاده از شکل مودهای شناسایی شده از روش FDD توابع طیفی یک درجه آزادی بل^[۲۶] تشکیل می‌شود. تابع بل، یک تابع ریاضی است که مشخصه‌ی آن، منحنی زنگوله‌ی شکل است. توابع بل معمولاً پیوسته و متقارن هستند و در ابتدا و انتها به سمت صفر نزدیک می‌شوند و تقریباً در

جدول ۲. بسامد طبیعی و میرایی شناسایی شده از روش EFDD به ازاء گام‌های بسامدی مختلف.

شماره‌ی مود	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶
بسامد طبیعی (هرتز)	۷,۹۲	۸,۰۰	۱۲,۷۳	۷۱,۴۰	۷۷,۰۲	۷۸,۴۳
گام بسامد (هرتز)						
میرایی (درصد)	۱,۸۸	۱,۲۸	۰,۸۴	۰,۳۶	۰,۲۹	۰,۲۱
	۰,۹۹	۰,۶۹	۰,۵۱	۰,۲۴	۰,۲۲	۰,۱۵
	۰,۵۵	۰,۳۶	۰,۳۱	۰,۱۷	۰,۱۸	۰,۱۲
	۰,۳۵	۰,۲۲	۰,۱۸	۰,۱۳	۰,۱۶	۰,۱۰
	۰,۲۷	۰,۱۴	۰,۱۲	۰,۱۱	۰,۱۵	۰,۰۹
	۰,۲۳	۰,۱۲	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۱۴	۰,۰۸
Max/min	۸,۱۷	۱۰,۶۷	۹,۳۳	۳,۲۷	۲,۰۷	۲,۶۳

جدول ۳. بسامد طبیعی و میرایی شناسایی شده از روش CFDD به ازاء گام‌های بسامدی مختلف.

شماره‌ی مود	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶
بسامد طبیعی (هرتز)	۷,۹۲	۸,۰۰	۱۲,۷۳	۷۱,۳۰	۷۷,۰۲	۷۸,۴۳
گام بسامد (هرتز)						
میرایی (درصد)	۲,۲۶	۱,۳۹	۰,۸۸	۰,۳۷	۰,۳۳	۰,۲۲
	۱,۱۱	۰,۶۸	۰,۵۲	۰,۲۳	۰,۲۴	۰,۱۶
	۰,۵۹	۰,۳۶	۰,۲۹	۰,۱۷	۰,۱۹	۰,۱۳
	۰,۳۸	۰,۲۲	۰,۱۶	۰,۱۴	۰,۱۶	۰,۱۱
	۰,۲۵	۰,۱۷	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۰
	۰,۲۱	۰,۱۵	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۰۹
Max/min	۱۰,۷۶	۹,۲۷	۹,۷۸	۳,۳۶	۲,۵۴	۲,۴۴

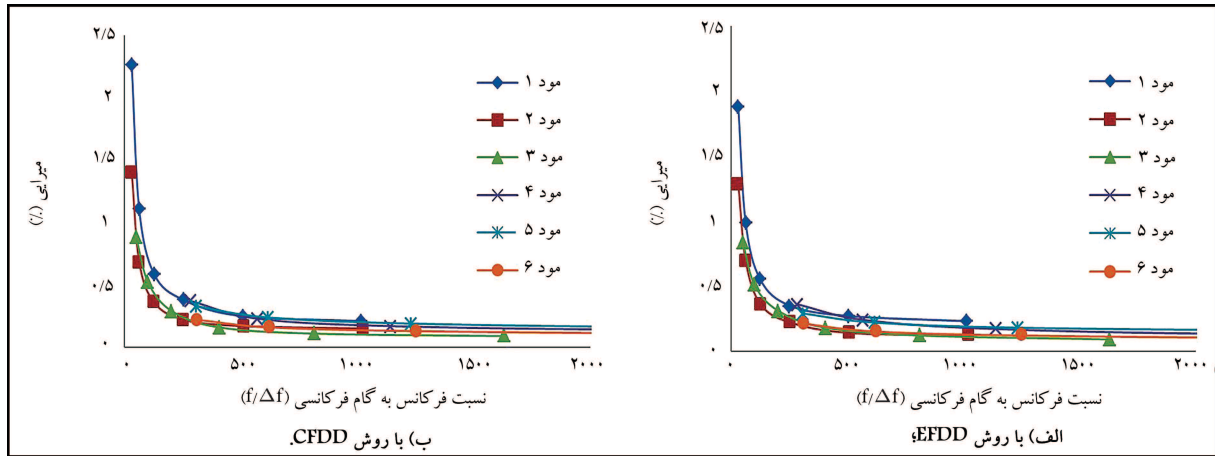
الف و ۷ - ب مشاهده می‌شود. همچنین مقایسه‌ی شکل‌های ۷ - الف و ۷ - ب با شکل ۷ - ج نشان می‌دهد که مقادیر میرایی به دست آمده در هر مود از مقادیر متناظر تئوری در نمودار ۷ - ج بزرگ‌تر است. منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۷ - ج با فرض وجود خطای آریبی ۲٪ به دست آمده است، که اختلاف نمودارها می‌تواند به علت بزرگ‌تر بودن خطای آریبی از ۲٪ و همچنین وجود خطاهای دیگر باشد.

۶. تعیین گام بسامدی مناسب

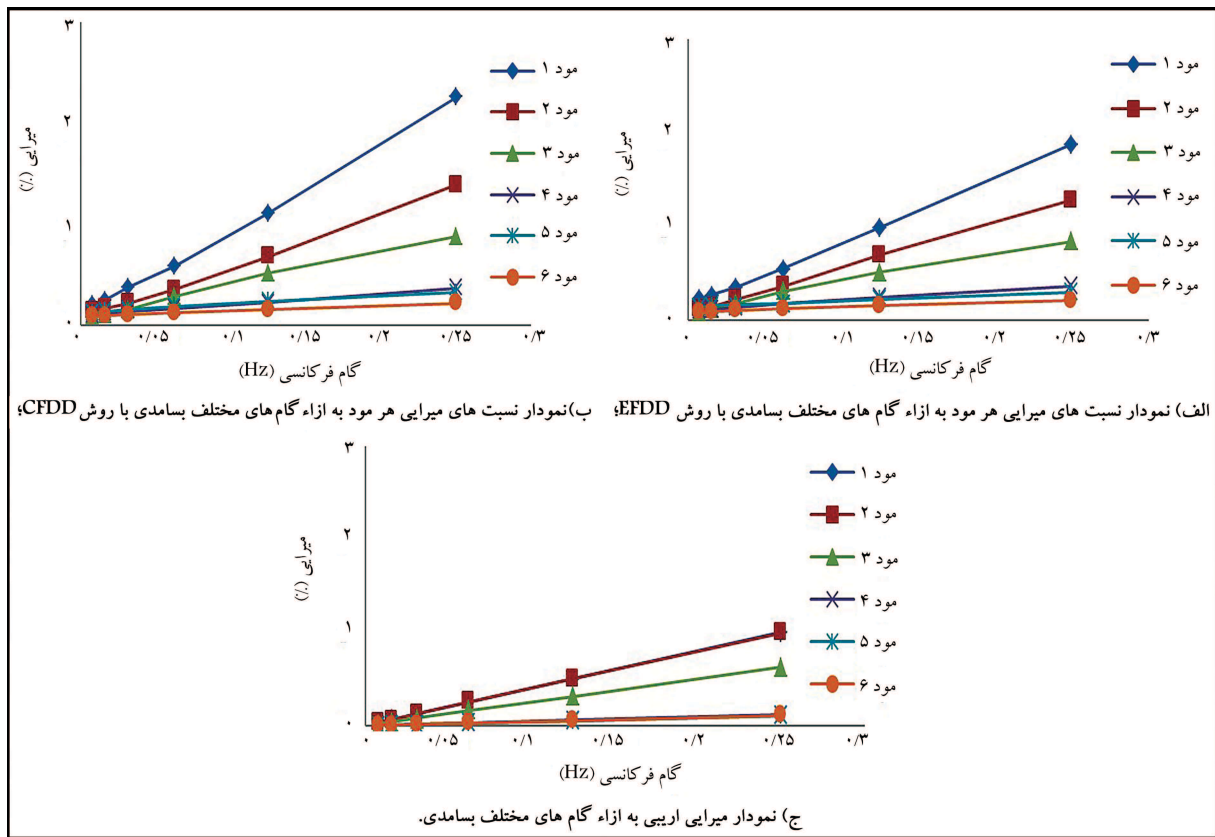
با توجه به نتایج جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که مقادیر میرایی با تغییرات گام بسامدی دستخوش تغییر می‌شوند. همان طوری که قبلاً نیز اشاره شده است، وجود دو نوع خطای آریبی و تصادفی در اطلاعات خروجی و در حین تبدیلات فوریه در روش‌های حوزه‌ی بسامد، دلیل اصلی تغییرات اخیر است. از آنجایی که مطابق روابط ارائه شده‌ی خطاها در قسمت ۲، با افزایش گام بسامدی Δf ، خطای آریبی افزایش و خطای تصادفی کاهش می‌یابد. بنابراین، در صورت استفاده از روش‌های حوزه‌ی بسامد جهت شناسایی میرایی از آزمایش خروجی - تنها، باید یک گام بسامدی مناسب که مجموع خطاهای مذکور را کمینه سازد، تعیین شود. بدین منظور، باید یک مقدار مینا (مرجع) برای میرایی، جهت مقایسه با نتایج حاصل تعیین شود. گام بسامدی مناسب جهت تخمین میرایی، گامی است که کمترین اختلاف میان نتایج میرایی شناسایی شده در آن گام با مقدار مینا وجود داشته باشد. در پژوهش حاضر، با انجام یک آزمایش مودال ورودی - خروجی بر روی سازه و استفاده از روش

۲ و ۳، مقادیر نسبت‌های میرایی با افزایش شماره‌ی مود، عمدتاً کاهش یافته است. کاهش میرایی سازه در مودهای بالاتر را می‌توان به نحوه‌ی تغییر شکل سازه در هر مود (یا همان شکل مود) نسبت داد. زیرا در سازه‌های مونتاژ شده از اجزای مختلف جدا از هم، معمولاً سهم زیادی از میرایی سازه در نواحی پیوندها متمرکز است و بنابراین می‌توان گفت آن شکل مودهایی که تغییر شکل بیشتری در پیوندها ایجاد کنند، میرایی بیشتری نشان می‌دهند.^{[۴] [۴۴]} با مقایسه‌ی نسبت میرایی پیشینه به کمینه‌ی به دست آمده در گام‌های مختلف برای هر مود، به عنوان معیاری برای نشان دادن پراکندگی نتایج میرایی مشاهده می‌شود، که این نسبت در جدول‌های ۲ و ۳، با افزایش شماره‌ی مود در هر دو روش EFDD و CFDD کاهش می‌یابد. کاهش پراکندگی نتایج در مودهای بالاتر به دلیل تأثیر مقدار بسامد در خطای آریبی مطابق رابطه‌ی ۹ است.

مطابق جدول‌های ۲ و ۳، مقادیر میرایی با کاهش گام بسامدی کاهش یافته‌اند. برای نشان دادن این روند کاهش، نمودار تغییرات میرایی مود اول سازه در مقابل نسبت بسامد طبیعی به گام بسامدی $(\frac{f}{\Delta f})$ از روش‌های EFDD و CFDD به ترتیب در شکل ۶ الف و ب ارائه شده است. با کاهش گام بسامدی Δf ، قله‌های نمودار تخمین زده شده PSD تیزتر شده و در نتیجه، مقدار میرایی کاهش یافته است. روند تغییرات میرایی به ازاء گام‌های مختلف در دو روش EFDD و CFDD به ترتیب در شکل‌های ۷ - الف و ۷ - ب ملاحظه می‌شود. نمودار میرایی تئوری آریبی نیز با استفاده از رابطه‌ی تئوری ۹، در شکل ۷ - ج ارائه شده است، که نشان می‌دهد روند تغییرات میرایی با افزایش گام بسامدی، خطی است. روند خطی بودن تقریباً در نتایج به دست آمده از روش‌های EFDD و CFDD به ترتیب در شکل‌های ۷ -



شکل ۶. نمودار نسبت‌های میرایی هر مود به نسبت بسامد مودی بر گام بسامدی.



شکل ۷. نمودار نسبت‌های میرایی هر مود به ازاء گام‌های مختلف بسامدی با روش‌های مختلف.

جدول ۴. نتایج میرایی شناسایی شده از روش ورودی - خروجی حوزه‌ی زمان ITD.

شماره‌ی مود	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶
میرایی (درصد)	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۲

و CFDD با روش ITD به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. مطابق جدول‌های مذکور، عمدتاً در مودهای پایین، اختلاف نتایج شناسایی شده با مقدار مینا بیشتر بوده و در مودهای بالاتر، اختلاف مذکور کاهش یافته است. همچنین اختلاف

ITD، [۴۵] یک مقدار مینا جهت مقایسه با نتایج گام‌های مختلف تعیین شده است. انتخاب این نتایج به عنوان مینا به این دلیل است که اولاً؛ پاسخ‌های به دست آمده از روش‌های ورودی - خروجی نسبت به روش‌های خروجی - تنها، به واسطه‌ی کنترل و اندازه‌گیری تحریک ورودی، قابل اعتمادتر و دارای عدم قطعیت کمتری می‌باشد. [۴۶] و ثانیاً، در روش‌های شناسایی حوزه‌ی زمان، خطای آریبی اشاره شده در بخش ۱.۲، که یکی از دو منبع اصلی بروز خطا در نتایج میرایی است، وجود ندارد. [۴۶] نتایج میرایی به دست آمده از روش ITD در جدول ۴ ارائه شده است. اندازه‌ی درصد اختلاف نسبی نتایج میرایی شناسایی شده از روش‌های EFDD

جدول ۵. اندازه درصد اختلاف نسبی نتایج میرایی با گام‌های مختلف در روش EFDD با روش ITD به همراه مقدار RMS.

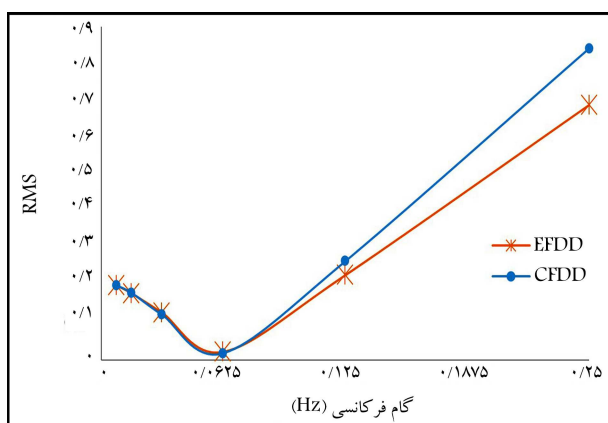
RMS	شماره‌ی مود						گام بسامدی (هرتز)
	مود ۶	مود ۵	مود ۴	مود ۳	مود ۲	مود ۱	
۰٫۶۹	۷۵٫۰۰	۵۲٫۶۳	۱۵۷٫۱۴	۱۸۰٫۰۰	۲۲۸٫۱۴	۲۲۴٫۱۴	۰٫۲۵۰۰
۰٫۲۳	۲۵٫۰۰	۱۵٫۷۹	۷۱٫۴۳	۷۰٫۰۰	۷۶٫۹۲	۷۰٫۶۹	۰٫۱۲۵۰
۰٫۰۲	۰٫۰۰	۵٫۲۶	۲۱٫۴۳	۳٫۳۳	۷٫۶۹	۵٫۱۷	۰٫۰۶۲۵
۰٫۱۳	۱۶٫۶۷	۱۵٫۷۹	۷٫۱۴	۴۰٫۰۰	۴۳٫۵۹	۳۹٫۶۶	۰٫۰۳۱۳
۰٫۱۸	۲۵٫۰۰	۲۱٫۰۵	۲۰٫۷۱	۶۰٫۰۰	۶۴٫۱۰	۵۳٫۴۵	۰٫۰۱۵۶
۰٫۲	۳۳٫۳۳	۲۶٫۳۲	۲۱٫۴۳	۷۰٫۰۰	۶۹٫۲۳	۶۰٫۳۴	۰٫۰۰۷۸

جدول ۶. اندازه درصد اختلاف نسبی نتایج میرایی با گام‌های مختلف در روش CFDD با روش ITD به همراه مقدار RMS.

RMS	شماره‌ی مود						گام بسامدی (هرتز)
	مود ۶	مود ۵	مود ۴	مود ۳	مود ۲	مود ۱	
۰٫۸۴	۸۳٫۳۳	۷۳٫۶۸	۱۶۴٫۲۹	۱۹۳٫۳۳	۲۵۶٫۴۱	۲۸۹٫۶۶	۰٫۲۵۰۰
۰٫۲۳	۳۳٫۳۳	۲۶٫۳۲	۶۴٫۲۹	۷۳٫۳۳	۷۴٫۳۶	۹۱٫۳۸	۰٫۱۲۵۰
۰٫۰۲	۸٫۳۳	۰٫۰۰	۲۱٫۴۳	۳٫۳۳	۷٫۶۹	۱٫۷۲	۰٫۰۶۲۵
۰٫۱۳	۸٫۳۳	۱۵٫۷۹	۰٫۰۰	۴۶٫۶۷	۴۳٫۵۹	۳۴٫۴۸	۰٫۰۳۱۳
۰٫۱۸	۱۶٫۶۷	۲۶٫۳۲	۱۴٫۲۹	۶۳٫۳۳	۵۶٫۴۱	۵۶٫۹۰	۰٫۰۱۵۶
۰٫۲	۲۵٫۰۰	۳۱٫۵۸	۲۱٫۴۳	۷۰٫۰۰	۶۱٫۵۴	۶۳٫۷۹	۰٫۰۰۷۸

جدول ۷. خلاصه‌ی نتایج اندازه‌گیری میرایی به روش‌های مختلف.

روش	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶
میرایی EFDD (%)	۰٫۵۵	۰٫۳۶	۰٫۳۱	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۱۲
میرایی CFDD (%)	۰٫۵۹	۰٫۳۶	۰٫۲۹	۰٫۱۷	۰٫۱۹	۰٫۱۳
میرایی ITD (%)	۰٫۵۸	۰٫۳۹	۰٫۳۰	۰٫۱۴	۰٫۱۹	۰٫۱۲
اختلاف نسبی EFDD با ITD (%)	۵٫۱۷	۷٫۶۹	۳٫۳۳	۲۱٫۴۳	۵٫۲۶	۰٫۰۰
اختلاف نسبی CFDD با ITD (%)	۱٫۷۲	۷٫۶۹	۳٫۳۳	۲۱٫۴۳	۰٫۰۰	۸٫۳۳



شکل ۸. RMS اختلافات مربوط به ۶ مود اول شبکه در گام‌های مختلف با روش‌های EFDD و CFDD.

روش خروجی - تنهای EFDD و CFDD با وجود اختلاف الگوریتم شناسایی، بسیار به هم نزدیک بودند، که نشان‌دهنده دقت برآوردهاست. همچنین نتایج دو روش اخیر، با نتایج روش ورودی - خروجی ITD نیز نزدیکی مناسبی دارند. صرف

نسبی نتایج میرایی با مقدار مبنا در گام بسامدی ۰٫۰۶۲۵ هرتز عمدتاً در همه‌ی مودها کمترین مقدار را داشته است. به عنوان معیاری برای مقایسه، جذر میانگین مربع (RMS) ۱۴ اختلاف‌های مقادیر میرایی در هر گام در ستون آخر جدول‌های ذکر شده ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو روش EFDD و CFDD، کمترین اختلاف جذر میانگین مربع داده‌ها در گام بسامدی ۰٫۰۶۲۵ هرتز اتفاق افتاده است، که برابر ۰٫۰۲ است.

۷. مقایسه و بحث

نمودارهای RMS اختلافات مربوط به ۶ مود اول شبکه در گام‌های مختلف و با روش‌های EFDD و CFDD در شکل ۸ رسم شده است، که مطابق آن کمترین خطای بین میرایی روش‌های حوزه‌ی بسامد و میرایی مبنا (حوزه‌ی زمان روش ورودی - خروجی) در گام بسامدی ۰٫۰۶۲۵ هرتز ایجاد شده است. با توجه به این‌که گام اخیر، گامی مناسب برای سازه‌ی مذکور تعیین شده است، خلاصه‌ی نتایج اندازه‌گیری میرایی با روش‌های مختلف در گام بسامدی ۰٫۰۶۲۵ و اختلاف نتایج با هم در جدول ۷ ارائه شده است، که مطابق آن، نتایج میرایی شناسایی شده از دو

نتایج آن به عنوان مبنا برگزیده شده بود، مقایسه شد، که در نتیجهی آن، گام مناسب این سازه که نتایج متناظر آن کمترین اختلاف را با مقادیر مبنا دارد، انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر میرایی به شدت تحت تأثیر گام‌های بسامدی قرار دارند، به طوری که در اثر کاهش اندازه‌ی گام‌های بسامدی، نسبت‌های میرایی نیز کاهش می‌یابد و این کاهش به صورت تقریباً خطی در همه‌ی مودها اتفاق می‌افتد. پراکندگی نتایج میرایی شناسایی شده در گام‌های بسامدی مختلف در مودهای بالاتر کمتر شده است، که به دلیل کاهش تأثیر خطای آریبی در مودهای مذکور است؛ در واقع، مقایسه‌ی مقادیر میرایی شناسایی شده از روش‌های EFDD و CFDD با مقادیر متناظر از روش ITD نشان می‌دهد که اختلاف این نتایج با افزایش شماره‌ی مود، از مود اول به مود ششم کاهش یافته است. اختلاف نتایج روش‌های شناسایی خروجی - تنها و ورودی - خروجی با افزایش گام از 0.078 به 0.625 هرتز کاهش و سپس با افزایش گام از 0.625 به 0.250 هرتز افزایش یافته است. با محاسبه‌ی جذر مربع میانگین خطاهای مربوط به ۶ مود مورد بررسی، گام بسامدی 0.625 هرتز به عنوان گام مناسب جهت تخمین میرایی با روش‌های حوزه‌ی بسامد برای این سازه انتخاب شد؛ زیرا کمترین اختلاف میرایی میان روش‌های شناسایی خروجی - تنها و ورودی - خروجی در این گام اتفاق افتاده است. در این گام، جذر میانگین مربع اختلاف میرایی ۶ مود اول سازه بین دو روش خروجی - تنهای EFDD و CFDD با مقادیر متناظر از روش ITD برابر 0.02 شده است.

مقادیر نسبت‌های میرایی مودی اندازه‌گیری شده حاکی از کوچک بودن میرایی سازه‌ی مورد مطالعه (کسری از ۱٪) است، که برای یک سازه بدون اجزاء غیرسازایی منطقی است. بر اساس نتایج به دست آمده از روش‌های EFDD و CFDD و نیز ITD، روند تغییر میرایی از مود اول تا ششم شبکه تقریباً به صورت نزولی است. به طوری که مقادیر میرایی در گام بسامدی 0.625 و در مودهای اول و ششم در روش EFDD به ترتیب 0.55 و 0.12 و در روش CFDD به ترتیب 0.59 و 0.13 است.

نظر از اختلاف میرایی میان روش‌های خروجی - تنها و ورودی - خروجی در مود چهارم، که حدود ۲۲٪ شده است، در سایر مودها بیشینه‌ی حدود ۸٪ خطا مشاهده می‌شود. مطابق نتایج جدول ۷، سیستم سازه‌ی مورد مطالعه، میرایی کمی دارد، که برای یک سازه و بدون اجزاء غیرسازه‌ی، منطقی است.

در مقایسه با کار دیگران، مطابق نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر در جدول‌های ۲ و ۳، پراکندگی بیشتری در مقادیر میرایی نسبت به بسامدهای طبیعی شناسایی شده این شبکه مشاهده شده است، که با نتایج ارائه شده در برخی مراجع^[۱۲، ۱۳] مطابقت دارد. همچنین علی‌رغم نتایج ارائه شده در مراجع دیگر^[۲۱، ۲۲] که محدوده‌ی خطای برآورد میرایی به کمک روش شناسایی خروجی - تنها قابل ملاحظه گزارش شده است، در پژوهش حاضر نشان داده شده است که با انتخاب گام بسامدی مناسب به منظور برآورد میرایی یک سازه، می‌توان مجموع خطاهای موجود را کمینه ساخت و به یک جواب با دقت بالا دست یافت؛ برخلاف آنچه که در برخی مراجع^[۱۹، ۲۰] به غیردقتی بودن نتایج میرایی از روش خروجی - تنها اشاره شد. در حالی که در مراجع دیگر^[۱۲-۱۴] به اختلاف نتایج میرایی شناسایی شده میان روش‌های مختلف خروجی - تنها اشاره شد، در این شبکه تفاوت قابل ملاحظه‌ی بین برآوردهای میرایی از دو روش خروجی - تنهای EFDD و CFDD مشاهده نشده است.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روند تغییرات میرایی یک شبکه‌ی دولایه با سیستم پیونده‌ی گویسان با تغییرات گام بسامدی مد نظر قرار گرفت. بدین منظور، یک شبکه‌ی دولایه در محیط آزمایشگاه ساخته شد و با انجام آزمایش مودال خروجی - تنها، نسبت میرایی مودی ۶ مود اول این سازه (مودهای با بسامد طبیعی زیر 100 هرتز) استخراج شد. نسبت‌های میرایی به کمک روش‌های حوزه‌ی بسامد EFDD و CFDD و با گام‌های مختلف تعیین شد و نتایج این برآورد با روش ورودی - خروجی ITD، که

پانویس‌ها

1. output-only and input-output modal identification
2. enhanced frequency domain decomposition
3. curve-fit frequency domain decomposition
4. bias error
5. random error
6. ibrahimtime domain
7. power spectral density
8. Bendat
9. Brandt
10. Nyquist-Shannon
11. Brincker & Ventura
12. frequency domain decomposition
13. Bell
14. root mean square

منابع (References)

1. Davoodi, M.R., Amiri, J.V., Gholampour, S. and et al. "Determination of nonlinear behavior of a ball joint system by model updating", *J. Constr. Steel Res.*, **71**, pp. 52-62 (2012).
2. Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R. and Amiri, J.V. "Experimental determination of the natural frequencies of a full scale double layer grid with ball joint system", *15th World Conf. Earthq. Eng (2012)*.
3. Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R. and Amiri, J.V. "Ball joint behavior in a double layer grid by dynamic model updating", *J. Constr. Steel Res.*, **76**, pp. 28-38 (2012).
4. Salehi, S., Davoodi, M.R. and Mostafavian, S.A. "Estimation of damping for a double-layer grid us-

- ing input-output and output-only modal identification techniques”, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **53**(2), pp.295-311 (2020).
5. Davoodi, M.R., Pashaei, M.H. and Mostafavian, S.A. “Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double-layer grids”, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, **48**(1), pp. 45-52 (2007).
 6. Davoodi, M.R., Mahdavi, M. and Mostafavian, S.A. “Experimental and analytical determination of dynamic properties of a steel frame with bolted flange joints”, *In Proceedings of International Conference on Engineering and Information Technology, Toronto, Canada*, pp. 17-18 (Sep 2012).
 7. Ghods, A., Esfahani, M.R. and Keivani, A.H. “Experimental investigation and numerical analysis of vibrational behavior of rectangular concrete water storage tanks”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **4**, pp. 105-113 (2012) (in persian).
 8. Mostafavian, S.A., Nabavian, S.R., Davoodi, M.R. and et al. “Output-only modal analysis of a beam via frequency domain decomposition method using noisy data”, **32**(12), pp. 1753-1761 (2019).
 9. Davoodi, M.R., Navayi neya, B., Mostafavian, S.A. and et al. “Determining minimum number of required accelerometer for output-only structural identification of frames”, *7th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC' 17)*, Ingolstadt, Germany, (May10-12 2017).
 10. Orlowitz, E. and Brandt, A. “Comparison of experimental and operational modal analysis on a laboratory test plate”, *Measurement*, **102**, pp. 121-130 (2017).
 11. Chiaia, B., Marasco, G., Ventura, G. and et al. “Customised active monitoring system for structural control and maintenance optimisation”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **10**(2), pp.267-282 (Jan 28 2020).
 12. Kudu, F.N., Uçak, S., Osmancikili, G. and et al. “Estimation of damping ratios of steel structures by Operational Modal Analysis method”, *J. Constr. Steel Res.*, **112**, pp. 61-68 (2015).
 13. Nouri, A. and Hajirezaee, S. “A comparison between modal damping ratios identified by NEXT-ERA and frequency domain impact test”, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, **8**(1), pp. 15-24 (Sep 2018).
 14. Bajrić, A., Hogsberg, J. and Rüdinger, F. “Evaluation of damping estimates by automated Operational Modal Analysis for offshore wind turbine tower vibrations”, *Renew. Energy*, **116**, pp. 153-163 (2018).
 15. Cantieni, R., Bajrić, A. and Brincker, R. “Damping characteristics of a footbridge: mysteries and truths”, *In Dynamics of Coupled Structures*, **4**, pp. 283-292, Springer, Cham (2016).
 16. Castellanos-Toro, S., Marmolejo, M., Marulanda, J. and et al. “Frequencies and damping ratios of bridges through operational modal analysis using smartphones”, *Construction and Building Materials*, **10**(188), pp. 490-504 (Nov 2018).
 17. Kvåle, K.A., Oiseth, O. and Ronnquist, A. “Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge”, *Eng. Struct.*, **148**, pp. 410-423 (2017).
 18. Diord, S., Magalhães, F., Cunha, A. and et al. “High spatial resolution modal identification of a stadium suspension roof: assessment of the estimates uncertainty and of modal contributions”, *Eng. Struct.*, **135**, pp. 117-135 (2017).
 19. Chauhan, S. “Parameter estimation and signal processing techniques for operational modal analysis”, *PhD Thesis, University of Cincinnati, USA* (2008).
 20. Avitabile, P. “MODAL SPACE: Someone told me that operating modal analysis produces better results and that damping is much more realistic”, *Exp. Tech.*, **30**, pp. 25-26 (2006).
 21. Rainieri, C., Fabbrocino, G. and Cosenza, E. “Some remarks on experimental estimation of damping for seismic design of civil constructions”, *Shock and Vibration*, **17**(4-5), pp. 383-395, (2010).
 22. Rainieri, C. and Fabbrocino, G. “Accurate damping estimation by automated OMA procedures”, *Topics in Dynamics of Civil Structures*, **4**, pp. 1-9, Springer, New York, NY, (2013).
 23. Bendat, J.S. and Piersol, A.G. “Random data: analysis and measurement procedures”, *John Wiley & Sons*, New York, USA, (2011).
 24. Reynders, E. “System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, **19**(1), pp. 51-124 (Mar, 2012).
 25. Josefsson, A., Ahlin, K. and Broman, G. “Bias errors due to leakage effects when estimating frequency response functions”, *Shock and Vibration*, **19**(6), pp. 1257-1266 (2012).
 26. Purekar, D. “A study of modal testing measurement errors, sensor placement and modal complexity on the process of finite element correlation”, *Doctoral Dissertation, University of Cincinnati* (2005).
 27. Rainieri, C., Fabbrocino, G. and Cosenza, E. “On damping experimental estimation”, *Proceedings of the 10th International Conference on Computational Structures Technology, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland* (2010).
 28. Dahl, J.F. and Smith, C.C. “Better narrowband spectral measurements”, *Mechanical systems and signal processing*, **21**(6), pp. 2474-2495 (Aug 2007).
 29. Brownjohn, J.M.W. “Assessment of Structural Integrity by Dynamic Measurements”, *Ph.D. Thesis, University of Bristol*, Bristol, England (1988).
 30. Tamura, Y., Yoshida, A., Zhang, L. and et al. “Examples of modal identification of structures in Japan by FDD and MRD techniques”, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark (2005).
 31. Antoni, J. and Schoukens, J. “A comprehensive study of the bias and variance of frequency-response-function measurements: Optimal window selection and overlapping strategies”, *Automatica*, **43**(10), pp. 1723-1736 (Oct 2007).

32. Verboven, P. "Frequency-domain system identification for modal analysis", *Vrije Universiteit Brussel, Brussels* (May 2002).
33. Brandt, A., Brincker, R. and Ahlin, K. "Welchs method for PSD estimation - revisited", *Presentation at International Operational Modal Analysis Conference Workshop*, Copenhagen, Denmark (2006).
34. Brandt, A. "Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures", *John Wiley & Sons* (2011).
35. Kipnis, A., Eldar, Y.C. and Goldsmith, A.J. "Analog-to-digital compression: a new paradigm for converting signals to bits", *IEEE Signal Processing Magazine*, **35**(3), pp. 16-39 (2018).
36. Rainieri, C. and Fabbrocino, G. "Operational modal analysis of civil engineering structures: an introduction and guide for applications", *Springer* (2014).
37. Batel, M. "Operational modal analysis-Another way of doing modal testing", *Sound Vib.*, pp. 22-27,(2002).
38. Brincker, R. and Ventura, C. "Introduction to operational modal analysis", *1st ed.*, *John Wiley & Sons* (2015).
39. Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition", *Proceedings of the 18th SEM International Modal Analysis Conference, San Antonio, TX, USA* (2000).
40. Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", *Smart Mater. Struct.*, **10**, pp. 441-445 (2001).
41. Gade, S., Mooler, NB., Herlufsen, and et al. "Frequency domain techniques for operational modal analysis", *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Denmark* (2005).
42. Jacobsen, N.J., Andersen, P. and Brincker, R. "Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique", *In Proceedings IMAC XXVI Conference* (Feb. 4 2008).
43. ARTeMIS Modal 4, Issued by Structural Vibration Solutions AVS. NOVI Science Park, Niles Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark.
44. Mostafavian, S.A. "Finite element model updating of a double-layer grid with ball-jointed system using experimental dynamic responses", *PhD thesis*, Babol Noshiravani University of Technology(2012).
45. He, J. and Fu, Z.F. "Modal analysis, Butterworth-Heinemann", (2001).
46. Hoa, L.T., Tamura, Y., Yoshida, A. and et al. "Frequency domain versus time domain modal identifications for ambient excited structures", *In International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA)*, pp. 1-2 (2010).