

شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان به کمک روش‌های خروجی-تنها

سیدرسول نبویان^{۱*}، سیدامین مصطفویان^۲، بهرام نوائی نیا^۳، محمدرضا داودی^۴

۱. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ا... العظمی بروجردی.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران.

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

* رایانامه نویسنده مسئول: nabavian@abru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

چکیده

شبکه‌های دولایه ساخته‌شده با سیستم پیونده گویسان که دسته مهمی از سازه‌های فضاکار هستند، از جمله سازه‌های رایج و پرکاربرد برای اجرای سقف‌ها می‌باشند. شناسایی مشخصات دینامیکی این سازه‌ها برای تکمیل فرآیند پایش سلامت سازه‌ای، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود و تشخیص آسیب ضروری است. محدودیت‌های روش شناسایی ورودی-خروجی باعث شده که در سازه‌های مهندسی از روش خروجی-تنها استفاده شود. در این مطالعه، مدل فیزیکی یک شبکه دولایه به صورت تمام مقیاس در آزمایشگاه ساخته شد. با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها و با استفاده از دو روش حوزه بسامد تجزیه در حوزه بسامد تعمیم یافته (EFDD) و تجزیه در حوزه بسامد با برازش منحنی (CFDD) و نیز دو روش حوزه زمان شناسایی زیرفضای تصادفی با داده خام (SSI-DD) و شناسایی زیرفضای تصادفی با کوواریانس داده‌ها (SSI-Cov)، پارامترهای مودال این شبکه‌ی دولایه تعیین شدند. برای تحریک شبکه از دو نوع بارگذاری تحریک مستقیم و تحریک غیرمستقیم استفاده شد. به منظور بررسی دقت پارامترهای شناسایی‌شده، یک آزمایش مودال ورودی-خروجی نیز روی شبکه انجام و نتایج به دست آمده به عنوان مبنا انتخاب شدند. نتایج نشان داده که دقت پارامترهای شناسایی‌شده با بارگذاری مستقیم بالاتر از نتایج مشابه با بارگذاری غیرمستقیم بوده است. بیشترین اختلاف نتایج بسامدهای طبیعی شبکه‌ی دولایه با نتایج مبنا مربوط به مود دوم شبکه و برابر ۲/۰۷٪ بوده است. میانگین خطای نسبی پارامترهای شناسایی‌شده نشان داده که روش‌های حوزه زمان، نسبت میرایی را با خطای کمتری تخمین زدند؛ درحالی‌که روش‌های حوزه بسامد، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی را با دقت بالاتری شناسایی نمودند.

کلمات کلیدی: شبکه دولایه، پیونده‌ی گویسان، شناسایی سازه‌ای، آزمایش مودال خروجی-تنها، روش‌های حوزه‌ی زمان، روش‌های حوزه بسامد.

۱- مقدمه

شناسایی سازه‌ای یکی از مباحث مهم مهندسی است که همواره مد نظر پژوهشگران قرار داشته است. منظور از شناسایی سازه‌ای، تعیین مشخصات مودال سازه یعنی بسامدهای طبیعی، شکل‌های مودی و نسبت‌های میرایی می‌باشد. یکی از کاربردهای شناسایی سازه‌ای، تکمیل چرخه پایش سلامت سازه‌ای و تشخیص آسیب می‌باشد. با وجود توسعه این مباحث در سازه‌های مختلف مهندسی از یک طرف و نیز کاربرد روزافزون شبکه‌های دولایه در پوشش

سقف سازه‌های با دهانه‌های بزرگ از طرف دیگر، همچنان مطالعات بسیار اندکی در زمینه‌ی شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه صورت پذیرفته است و تقریباً همه مطالعات انجام گرفته در زمینه تشخیص آسیب شبکه‌های دولایه به صورت تئوری و عددی بوده است [1-2]؛ در حالی‌که گزارشات متعددی در مورد آسیب شبکه‌های دولایه ساخته شده وجود دارد [3-5].

روش‌های شناسایی سازه‌ای تجربی به دو دسته روش‌های ورودی-خروجی و روش‌های خروجی-تنها تقسیم‌بندی می‌شوند. به دلیل محدودیت‌های روش شناسایی ورودی-خروجی [6-7]

عملاً پیاده‌سازی این روش فقط در محیط آزمایشگاه امکان‌پذیر بوده و برای سازه‌های واقعی در مهندسی عمران از روش شناسایی خروجی-تنها استفاده می‌شود [8-9]. در روش شناسایی خروجی-تنها امکان تخمین آزمایشگاهی مشخصات دینامیکی سازه، تنها با اندازه‌گیری پاسخ ارتعاش فراهم می‌باشد. مراجع متعددی در مورد کاربرد روش‌های متعدد شناسایی خروجی-تنها در انواع مختلف سازه‌ها وجود دارد که برای نمونه می‌توان به استفاده از روش‌های جستار قله^۱ (PP) و زیرفضای تصادفی بر مبنای داده‌های خام^۲ (SSI-DD) برای یک ساختمان بتنی ۱۵ طبقه [10]، روش SSI-DD برای یک ساختمان فولادی سه طبقه [11]، روش تجزیه در حوزه بسامد^۳ (FDD) برای یک خرپای فلزی [12]، روش PP برای ساختمان مرکز جهانی مالی شانگهای [13]، روش تحریک طبیعی^۴ (NExT) برای شش فانوس دریایی [14]، روش‌های FDD و SSI-DD برای یک ساختمان چوبی [15]، روش SSI-DD برای یک برج با مصالح بنایی [16]، روش بیزین برای یک پل کابلی [17]، روش زیرفضای تصادفی بر مبنای کواریانس داده‌ها^۵ (SSI-Cov) برای یک سد بتنی [18]، روش SSI-DD برای یک برج بلند ۲۳۰ متری [19]، روش SSI-DD برای یک پل قوسی با مصالح بنایی [20]، روش‌های FDD، تجزیه در حوزه بسامد بهبود یافته^۶ (EFDD) و SSI-DD برای یک پل بتنی [21] و روش FDD برای ساختمان‌های تاریخی [22] اشاره نمود. لی و همکاران [23] به کمک ۶ حسگر شتاب‌سنج ۶ جهته و با اندازه‌گیری ۳۶ نقطه از یک ساختمان صنعتی چند طبقه نشان دادند که چگونه با تعداد حسگرهای محدود می‌توان مشخصات سازه‌ای یک سازه را تعیین نمود. سیورا و همکاران [24] یک الگوریتم جدیدی به منظور شناسایی خودکار مودال سازه‌ها ارائه داده و کارایی آن را برای پل تمام مقیاس Z24 در سوئیس مورد ارزیابی و تایید قرار دادند. هوانگ و همکاران [25] با ارائه روش جدید تجزیه مودی عملکردی توانستند اطلاعات مودال سازه‌ها را شناسایی نمایند. مزیت روش آن‌ها این بود که دیگر الزامی به برقراری شرط ایستا بودن اطلاعات ورودی و خروجی به منظور شناسایی سازه‌ای

وجود ندارد. مصطفایی و همکاران [26] با معرفی یک الگوریتم توسعه یافته‌ای بر مبنای روش SSI-DD توانستند مشخصات مودال سد گرانشی کوینا را با دقت مناسبی تعیین نمایند. مئونی و همکاران [27] با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها روی دو دیوار بنایی آسیب دیده با مقیاس کامل در محیط آزمایشگاه و به کمک روش‌های EFDD و NExT توانستند همبستگی مناسبی بین تغییرات در ویژگی‌های مودال سازه و ظرفیت باقیمانده سازه برای تحمل بار ارائه دهند.

مطالعات زیادی در زمینه مقایسه پارامترهای شناسایی شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها در سازه‌ها انجام گرفته است. کیویل و همکاران [28] با استفاده از روش تحلیل مودال خروجی-تنها و به‌کارگیری روش‌های FDD، SSI-DD و SSI-Cov به بررسی پارامترهای سازه‌ای در پل برگسان در کشور نروژ پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که هر دو روش حوزه زمان شناسایی زیرفضای تصادفی از عملکرد بهتری نسبت به روش تجزیه در حوزه بسامد برخوردار بوده است. کابوی و همکاران [29] با استفاده از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov به شناسایی دینامیکی در یک پل راه‌آهن پرداختند. نتایج به دست آمده از دو روش حوزه‌ی زمان در این تحقیق نشان داد که روش SSI-Cov نسبت به روش SSI-DD در شناسایی مدهای سازه موفق‌تر بوده است. دیورد و همکاران [30] با استفاده از روش تحلیل مودال خروجی-تنها به شناسایی پارامترهای بسامد طبیعی و نسبت‌های میرایی در یک سقف ورزشگاه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که درصد اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی شناسایی شده میان روش‌های مختلف نسبت به مقادیر مشابه بسامد طبیعی بیشتر است. آلتانسیک و همکاران [31] با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها با استفاده از تحریک محیطی، به شناسایی پارامترهای مودال در یک سازه دو طبقه در آزمایشگاه با شرایط سالم، آسیب‌دیده، تعمیرشده و تقویت شده پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از روش SSI-DD و EFDD برای تعیین بسامدهای طبیعی، میرایی و شکل مدهای سازه موردنظر استفاده کردند. نتایج به دست آمده از دو روش حوزه زمان و بسامد نشان می‌دهد که مقادیر بسامدهای طبیعی و اشکال مودی تا اندازه‌ی زیادی بر هم منطبق بوده، اما مقادیر میرایی به دست آمده از دو روش دارای اختلافات زیادی می‌باشد. باجریک و همکاران [32]، به برآورد میرایی مودال در یک برج توربین بادی

¹ Peak Picking² Stochastic Subspace Identification-Data Driven³ Frequency Domain Decomposition⁴ Natural Excitation Method⁵ Stochastic Subspace Identification-Covariance Driven⁶ Enhanced Frequency Domain Decomposition

استفاده شد. به منظور ارزیابی دقت این روش‌ها در شناسایی پارامترهای مودال شبکه‌ی دولایه، یک آزمایش مودال ورودی-خروجی نیز انجام گرفت و نتایج شناسایی آن به دلیل عدم قطعیت کمتر [39] به عنوان نتایج مبنا انتخاب شد. در ادامه، دقت روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها بر اساس میزان اختلاف آنها با این مقدار مبنا سنجیده شد. روند انجام این تحقیق در شکل (۱) قابل ملاحظه است.

شکل ۱. روند انجام تحقیق

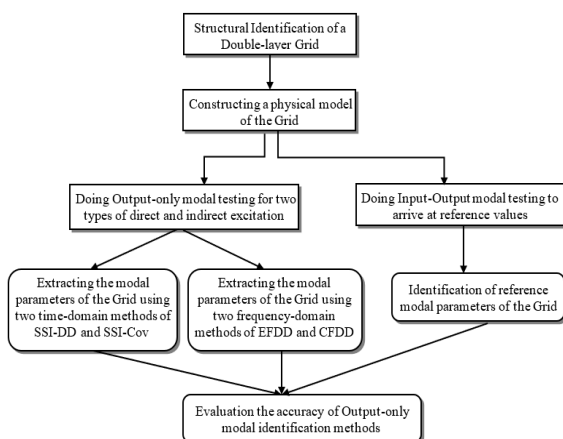


Fig. 1. The research flowchart

۲- شبکه دولایه ساخته شده

شبکه دولایه مورد مطالعه دارای دو دهانه در دو دهانه بوده و روی ۴ لوله فولادی به عنوان ستون‌های تکیه‌گاهی قرار دارد (شکل ۲). مدل سازه مورد مطالعه در شکل (۳) قابل ملاحظه می‌باشد. لایه‌های بالایی و پایینی شبکه با خطوط ضخیم و اعضای مورب اتصال دهنده این دولایه با خطوط نازک نشان داده شده است. اعضای این شبکه، لوله‌هایی به طول ۱/۴۱ متر با ضخامت ۳/۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۷۵/۴ میلی‌متر بوده که از طریق پیونده گویسان به هم متصل شده‌اند (شکل ۴-الف). طول ستون‌های تکیه‌گاهی ۱/۳ متر می‌باشد که محل قرارگیری این ستون‌ها در شکل (۳) با دایره‌های توپر قابل مشاهده است. مطابق شکل (۴-ب) اتصال پای ستون‌ها به صفحه‌ستون به صورت گیردار (جوش همراه با لچکی) ایجاد شده است. ارتفاع کلی سازه برابر مجموع ارتفاع ستون (۱/۳ متر) و فاصله بین دولایه (۱ متر) بوده که مساوی ۲/۳ متر می‌باشد. طول و ابعاد هندسی به کار رفته در این شبکه بر اساس نتایج مرجع [37] انتخاب شده است.

دریایی با روش خروجی-تنها پرداختند. آن‌ها از روش‌های حوزه زمان SSI-Cov و تحریک طبیعی-الگوریتم ارزیابی سیستم ویژه^۱ (Next-ERA) و همچنین EFDD برای تخمین میرایی استفاده نمودند. پس از انجام مطالعات تئوری روش SSI-Cov مناسب‌ترین روش برای برآورد میرایی در برج توربین بادی دریایی تعیین شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مطالعات اندکی در زمینه شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه انجام گرفته است. مصطفویان و همکاران [33] به کمک روش شناسایی ورودی-خروجی توانستند بسامدهای طبیعی یک شبکه دولایه ۲/۴ در ۳/۶ متری را تعیین نمایند. نتایج آن‌ها نشان داده که همبستگی مناسبی میان نتایج روش‌های مختلف شناسایی وجود دارد. صالحی و همکاران [34] در کار خود به تعیین نسبت‌های میرایی یک شبکه دولایه به کمک ۴ روش مختلف ورودی-خروجی و ۵ روش مختلف خروجی-تنها پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش ورودی-خروجی به طور میانگین ۶۵٪ بیشتر از نتایج مشابه از روش خروجی-تنها است. نبویان و همکاران [35] نسبت میرایی یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان را با روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها تخمین زدند. آن‌ها در کار خود نشان دادند که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش‌های EFDD و تجزیه در حوزه بسامد با برازش منحنی^۲ (CFDD) و SSI-DD سازگاری مطلوبی با هم دارند. صالحی و همکاران [36] به بررسی تاثیر گام بسامدی بر نتایج تخمین میرایی ۶ مود اول یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان از روش‌های EFDD و CFDD پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میان نسبت‌های میرایی مودی و گام بسامدی در هر مود رابطه تقریباً خطی برقرار است.

در این تحقیق، شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان مد نظر قرار گرفت. این موضوع به دلیل پیچیدگی رفتار پیونده [37-38] و تعداد زیاد درجات آزادی از یک سو و نیز مطالعات اندک در زمینه شناسایی سازه‌ای این نوع از سازه‌ها از سوی دیگر مورد توجه قرار گرفت. یک شبکه دولایه مربعی با ابعاد ۲/۸ متر در ۲/۸ متر با سیستم پیونده گویسان ساخته شد. برای شناسایی سازه‌ای شبکه از روش‌های مختلف حوزه زمان شامل SSI-DD و SSI-Cov و حوزه بسامد شامل EFDD و CFDD

¹ Natural Excitation technique-Eigensystem Realization Algorithm

² Curve-fitting Frequency Domain Decomposition

۳- آزمایش مودال خروجی-تنها

برای استخراج پارامترهای سازه‌ای شبکه مورد مطالعه از آزمایش مودال استفاده شده است. در آزمایش مودال خروجی-تنها، سیستم مورد مطالعه تحت یک سازوکار تحریک قرار گرفته و پاسخ خروجی آن اندازه‌گیری شده و با جمع‌آوری داده‌ها و پردازش سیگنال، مشخصات مودال آن سیستم به دست آمد.

به کمک اطلاعات مراجع [11 و 40]، دو نوع تحریک برای این سازه در نظر گرفته شد. در اولین نوع تحریک، بار به طور مستقیم با ضربه‌های متوالی در جهت و مکان تصادفی به نقاط مختلف سازه اعمال شد. در نوع دوم، تحریک به صورت غیرمستقیم و با اعمال ضربه‌های متوالی در جهت و مکان تصادفی به نقاط مختلف صفحه‌ستون‌ها (تکیه‌گاه‌های سازه) ایجاد شد. برای اندازه‌گیری پاسخ از چهار حسگر شتاب مدل A/120/V ساخت کارخانه DJB استفاده شد. سه حسگر به عنوان حسگرهای مرجع در تمام اندازه‌گیری‌ها ثابت نگه داشته شد که موقعیت و جهت آنها در شکل (۳) با علامت های X، Y و Z نشان داده شده که گره‌های دارای بیشترین شتاب مودی هستند و حسگر چهارم، متحرک بوده که در سایر گره‌های شبکه و در جهات مختلف در گردش بود. برای آزمایش کامل این سازه، با توجه به تعداد درجات آزادی، در مجموع ۳۶ اندازه‌گیری انجام گرفت. برای این سازه، با توجه به آزمایش‌های اولیه و پیشنهاد برینکر و ونچورا [41] مودهای با بسامد طبیعی زیر ۱۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفته و عملیات شناسایی تجربی نیز برای همین مودها انجام شد. مدت زمان اندازه‌گیری پاسخ این سازه بر اساس بسامد طبیعی و ضریب میرایی مودی مربوط به مود اول این شبکه از آزمایش‌های اولیه و رابطه پیشنهادی در مرجع [41]، ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین گام زمانی ثبت اطلاعات بر اساس رابطه نایکوئیست-شانون [41]، برابر ۰/۰۰۱۹۵۳۱۲۵ ثانیه انتخاب شد.

۴- تحلیل مودال خروجی-تنها

برای تخمین پارامترهای مودال شبکه مورد بررسی از روش‌های شناسایی خروجی-تنها استفاده شد. در انتخاب روش‌ها سعی شد که از هر یک از حوزه‌های زمان و بسامد، دو روش انتخاب شود؛ بدین منظور از روش‌های EFDD [42-43]، CFDD [44]، SSI-DD [45-47] و SSI-Cov [48] استفاده شد. برای انجام تحلیل مودال خروجی-تنها با استفاده از سه روش EFDD، CFDD

شکل ۲. شبکه دولایه ساخته شده در محیط آزمایشگاه



Fig. 2. The double layer Grid made in a Laboratory

شکل ۳. پلان مدل شبکه‌ی دولایه مورد مطالعه

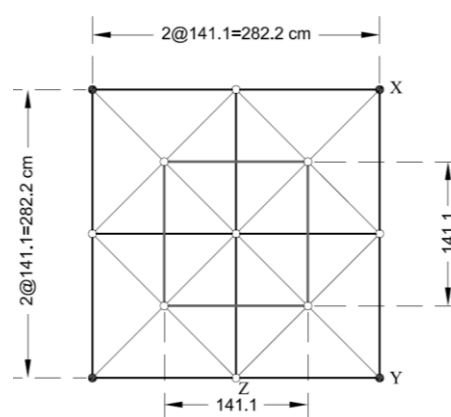


Fig. 3. Plan of the double layer Grid

شکل ۴. دو نوع پیونده به کار رفته در شبکه دولایه: الف-پیونده گویسان ب-

پیونده گیردار



الف-A



ب-B

Fig. 4. The two types of joints used in the double layer Grid: A) ball joint, B) clamped joint

طبیعی شبکه در دو نوع بارگذاری بسیار به هم نزدیک بوده؛ در حالی که پراکندگی نتایج میرایی شبکه بسیار بیشتر از نتایج بسامد طبیعی است. این نتیجه به دلیل عدم قطعیت بیشتر میرایی [41] قابل توجیه است و با نتایج مراجع [28، 30 و 31] مطابقت دارد. مطابق جدول (۲)، نسبت میرایی شناسایی شده با افزایش شماره مود، عموماً کاهش می‌یابد. این نتیجه در هر دو نوع بارگذاری مشاهده شده است. این موضوع به دلیل تیزتر بودن نمودار طیف پاسخ در نزدیکی موقعیت بسامدهای مربوط به مودهای بالاتر می‌باشد. همچنین مقادیر میرایی به دست آمده از هر دو روش نشان‌دهنده کوچک بودن میرایی شبکه دولایه مورد بررسی می‌باشد، به طوری که در هر دو روش EFDD و CFDD بیشترین مقدار میرایی نزدیک به یک درصد می‌باشد، که با نتایج به دست آمده از مراجع [50-52] مطابقت دارد.

جدول ۱. بسامدهای طبیعی (هرتز) شناسایی شده شبکه از روش‌های EFDD و CFDD

Mode Number	EFDD		CFDD	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	7.92	7.92	7.92	7.94
2	8.00	8.13	8.00	8.14
3	12.73	12.75	12.73	12.75
4	71.40	71.37	71.30	71.37
5	77.02	77.75	77.02	77.13
6	78.43	78.32	78.43	78.30
7	101.05	101.00	101.00	101.00

Table 1. Natural frequencies (Hz) of the gird identified via EFDD and CFDD

جدول ۲. نسبت‌های میرایی (درصد) شناسایی شده شبکه از روش‌های EFDD و CFDD

Mode Number	EFDD		CFDD	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	0.55	0.48	0.59	1.10
2	0.36	0.46	0.36	0.38
3	0.31	0.31	0.29	0.34
4	0.17	0.17	0.17	0.16
5	0.18	0.21	0.19	0.10
6	0.12	0.16	0.13	0.12
7	0.05	0.05	0.08	0.05

Table 2. Damping ratios (%) of the gird identified via EFDD and CFDD

نتایج بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی شناسایی شده شبکه دولایه با روش‌های SSI-DD و SSI-COV در جداول (۳ و ۴) ارائه شده است. مانند روش‌های حوزه بسامد در روش‌های حوزه زمان نیز تطابق مناسب نتایج بسامدهای طبیعی و پراکندگی نتایج

و SSI-DD از نرم‌افزار ARTeMIS Modal 6.0 [49] و برای استخراج نتایج روش SSI-Cov از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۵- نتایج شناسایی حاصل از روش‌های خروجی-تنها

برای حصول اطمینان از کیفیت آزمایش مودال خروجی-تنها، از تعریف تابع همبستگی [41] استفاده شد. یک نمونه از تابع PSD شتاب‌های ثبت شده شبکه به همراه تابع همبستگی مربوطه در شکل‌های (۵ و ۶) ارائه شد. در موقعیت ماکزیمم‌های نمودار PSD یعنی محل بسامدهای طبیعی در شکل (۵)، مقدار تابع همبستگی مطابق شکل (۶) بسیار نزدیک به یک می‌باشد که نشان‌دهنده درستی آزمایش مودال خروجی-تنها است.

شکل ۵. یک نمونه از تابع PSD شتاب شبکه

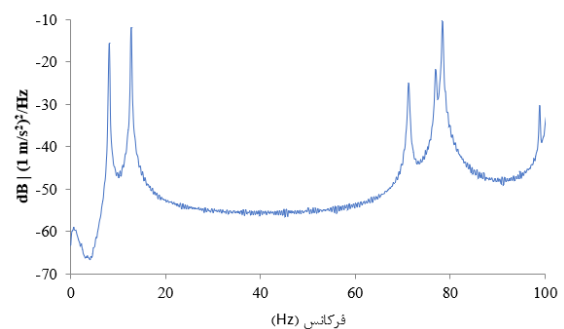


Fig. 5. A sample of Acceleration PSD for the grid

شکل ۶. تابع همبستگی مربوط به تابع PSD از یک نمونه شتاب شبکه

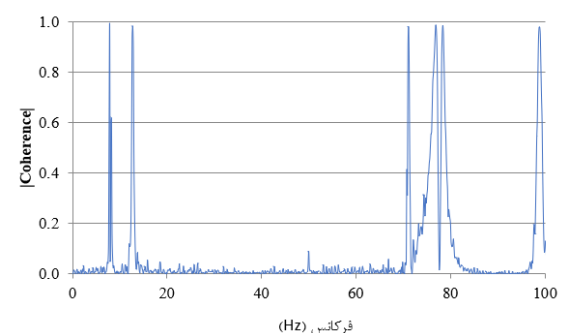


Fig. 6. The correlation function related to the PSD of Fig. 4

نتایج مربوط به بسامد طبیعی و نسبت میرایی ۷ مود اول شبکه با روش‌های EFDD و CFDD در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است. از آنجاکه دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم به سازه اعمال شده، پس نتایج برای هر کدام به تفکیک در این جداول آورده شده است. همان‌طور که از این جداول قابل ملاحظه است نتایج بسامدهای

روش مستقیم بیشتر از روش غیرمستقیم است.

جدول ۵. میانگین نتایج بسامدهای طبیعی (هرتز) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در هر دو نوع تحریک

Mode Number	Direct		Indirect	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	7.94	0.02	7.93	0.01
2	8.07	0.09	8.14	0.01
3	12.75	0.02	12.75	0.00
4	72.08	0.84	71.34	0.05
5	77.63	0.70	77.27	0.32
6	79.13	0.82	78.38	0.09
7	101.06	0.06	101.05	0.06

Table 5. The averages of natural frequencies (Hz) as well as their standard deviations for both types of loading

جدول ۶. میانگین نتایج نسبت‌های میرایی (درصد) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در هر دو نوع تحریک

Mode Number	Direct		Indirect	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	0.55	0.03	0.62	0.32
2	0.37	0.01	0.36	0.08
3	0.28	0.03	0.32	0.04
4	0.17	0.01	0.18	0.01
5	0.16	0.03	0.15	0.05
6	0.12	0.01	0.13	0.02
7	0.06	0.01	0.07	0.02

Table 6. The averages of damping ratios (%) as well as their standard deviations for both types of loading

به منظور مقایسه پارامترهای تخمین زده شده مربوط به هر دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم از روش‌های حوزه بسامد (EFDD و CFDD) با نتایج مشابه از روش‌های حوزه زمان (SSI-DD و SSI-Cov)، مقادیر میانگین و انحراف استاندارد مربوط به بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه‌ی دولایه در جداول (۷ و ۸) قابل ملاحظه است. با توجه به این جداول، پراکندگی نتایج بسامد طبیعی و میرایی در روش‌های حوزه بسامد عمدتاً کمتر از روش‌های حوزه زمان است.

۶- مقایسه و بحث

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده مربوط به تحلیل مودال خروجی-تنها از آزمایش مودال ورودی-خروجی استفاده شد. از آنجاکه آزمایش مودال ورودی-خروجی دارای قابلیت اطمینان بالاتری است [39]، نتایج آن به عنوان مبنا فرض شده و تخمین‌های به دست آمده از چهار روش SSI-DD، CFDD، EFDD و

میرایی مشاهده شد. با توجه به جدول (۴) ملاحظه می‌شود که میرایی به‌دست‌آمده با روش‌های SSI-DD در سه مود اول شبکه، مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به مودهای بعدی ارائه می‌دهند چراکه مودهای بالاتر به هم نزدیک شده و قله‌های نمودار تیزتر می‌شوند.

جدول ۳. بسامدهای طبیعی (هرتز) شناسایی شده‌ی شبکه از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov

Mode Number	SSI-DD		SSI-Cov	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	7.97	7.93	7.95	7.93
2	8.18	8.13	8.08	8.14
3	12.76	12.75	12.76	12.75
4	72.79	71.36	72.82	71.27
5	78.28	77.08	78.18	77.11
6	79.98	78.40	79.68	78.50
7	101.14	101.10	101.04	101.10

Table 3. Natural frequencies (Hz) of the gird identified via SSI-DD and SSI-Cov

جدول ۴. نسبت‌های میرایی (درصد) شناسایی شده‌ی شبکه از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov

Mode Number	SSI-DD		SSI-Cov	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	0.51	0.47	0.55	0.43
2	0.37	0.30	0.38	0.30
3	0.23	0.36	0.27	0.27
4	0.19	0.19	0.16	0.18
5	0.15	0.16	0.13	0.12
6	0.11	0.11	0.10	0.11
7	0.06	0.09	0.06	0.08

Table 4. Damping ratios (%) of the gird identified via SSI-DD and SSI-Cov

جداول (۵ و ۶) مربوط به میانگین نتایج بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه به همراه مقادیر انحراف استانداردشان برای چهار روش فوق‌الذکر در دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم می‌باشند. مقادیر کم ستون انحراف استاندارد در جدول (۵) نشانگر سازگاری خوب میان نتایج شناسایی شده بسامدهای طبیعی می‌باشد.

با توجه به جدول (۶)، میرایی در همه مودها عمدتاً در بارگذاری غیرمستقیم نسبت به بارگذاری مستقیم بیشتر شده است. از آنجاکه مشارکت تکیه‌گاه خارجی در مقدار میرایی سازه‌ها قابل‌توجه است و با توجه به این‌که در تحریک غیرمستقیم بار ورودی از طریق تکیه‌گاه به سازه اعمال شده، پس نقش تکیه‌گاه قابل‌توجه بوده و مقدار میرایی در تحریک غیرمستقیم عمدتاً بیشتر از تحریک مستقیم است. مقایسه مقادیر انحراف استاندارد نشان می‌دهد که سازگاری نتایج میرایی در

Table 8. The averages of damping ratios (%) as well as their standard deviations for both time and frequency methods

DD و SSI-Cov با نتایج مبنا مقایسه شدند.

در آزمایش مودال ورودی-خروجی از روش شتاب‌سنج ثابت-نیروی متحرک استفاده شد به طوری که شبکه دولایه تحت یک سازوکار تحریک قرارگرفته تا نیروی ورودی و پاسخ خروجی آن اندازه‌گیری شود. سه شتاب‌سنج با مشخصات گفته شده در بخش ۳، در جهات مختلف یکی از گره‌های شبکه نصب شده (گره سمت راست پایینی در شکل ۳) و نیروی ضربه چکش در تمامی گره‌ها و همه جهات اعمال شد. چکش مورد استفاده برای انجام این آزمایش، ساخت کارخانه DYTRAN و مدل 5802A با سر قهوه‌ای (که نرم‌ترین سر چکش بوده) [53] بوده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و پردازش سیگنال، توابع پاسخ بسامد به دست آمده و پارامترهای مودال سازه از همین توابع تعیین شدند. شکل (۷) یک نمونه از تابع پاسخ بسامد اندازه‌گیری‌شده شبکه مورد بررسی را به همراه تابع وابستگی مربوطه نشان می‌دهد. یکی از نشانه‌های حصول کیفیت مطلوب در اندازه‌گیری توابع پاسخ بسامدی، رسیدن به عدد یک برای تابع وابستگی مربوطه در نواحی دور از ضد تشدیدها است که در شکل (۷-ب) مشخص می‌باشد.

جدول ۷. میانگین نتایج بسامدهای طبیعی (هرتز) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در روش‌های حوزه‌ی زمان و بسامد

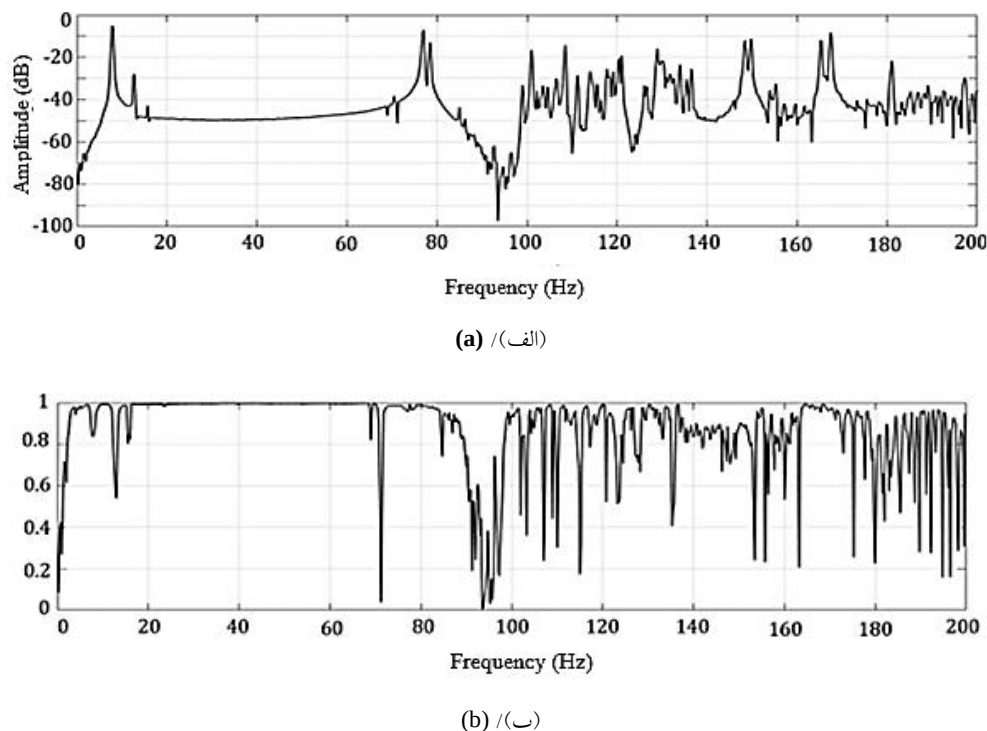
Mode Number	Time Domain		Frequency Domain	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	7.95	0.02	7.93	0.01
2	8.13	0.04	8.07	0.08
3	12.76	0.01	12.74	0.01
4	72.06	0.86	71.36	0.04
5	77.66	0.66	77.23	0.35
6	79.14	0.81	78.37	0.07
7	101.10	0.04	101.01	0.02

Table 7. The averages of natural frequencies (Hz) as well as their standard deviations for both time and frequency methods

جدول ۸. میانگین نتایج نسبت‌های میرایی (درصد) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در روش‌های حوزه‌ی زمان و بسامد

Mode Number	Time Domain		Frequency Domain	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	0.68	0.28	0.49	0.05
2	0.39	0.05	0.34	0.04
3	0.31	0.02	0.28	0.06
4	0.17	0.01	0.18	0.01
5	0.17	0.05	0.14	0.02
6	0.13	0.02	0.11	0.01
7	0.06	0.02	0.07	0.02

شکل ۷. الف) یک نمونه از تابع پاسخ بسامدی شبکه‌ی مورد بررسی و ب) تابع همبستگی مربوط به آن

**Fig. 7. (a):** A sample of Frequency Response Function (FRF) of the grid, (b): their correlation function

روش‌های شناسایی خروجی-تنهای حوزه زمان تخمین بالاتری از بسامد طبیعی نسبت به نتایج مبنا می‌زند. با توجه به این جداول در مجموع می‌توان گفت که بسامدهای طبیعی با دقت قابل قبولی یعنی با بیشینه خطای $2/63\%$ نسبت به مقدار مبنا شناسایی شدند.

جدول ۱۰. اختلاف نسبی مقادیر بسامد طبیعی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری مستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-0.13	-0.13	0.5	0.25
2	0.38	0.38	2.63	1.38
3	0.16	0.16	0.39	0.39
4	-0.24	-0.38	1.70	1.75
5	-0.23	-0.23	1.40	1.27
6	-0.31	-0.31	1.67	1.28
7	0.05	0.00	0.14	0.04

Table 10. The relative difference between natural frequencies estimated via output-only identification methods and base values in direct-typed loading

جدول ۱۱. اختلاف نسبی مقادیر بسامد طبیعی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-0.13	0.13	0.00	0.00
2	2.01	2.13	2.01	2.13
3	0.31	0.31	0.31	0.31
4	-0.28	-0.28	-0.29	-0.42
5	0.71	-0.09	-0.16	-0.12
6	-0.44	-0.47	-0.34	-0.22
7	0.00	0.00	0.10	0.10

Table 11. The relative difference between natural frequencies estimated via output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

۶-۲- مقایسه نسبت‌های میرایی

مقادیر اختلاف نسبی مقادیر نسبت میرایی شناسایی شده بین دو روش خروجی-تنها و ورودی-خروجی در جدول‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. مطابق این جداول، سازگاری مطلوبی میان نتایج میرایی شبکه از روش‌های مختلف وجود ندارد.

جدول ۱۲. اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری مستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-11.30	-4.84	-17.7	-11.29
2	-10.00	-10.00	-7.50	-5.00
3	0.00	-6.45	-25.8	-12.9
4	21.43	21.43	35.71	14.29
5	38.46	46.15	15.38	0.00
6	71.43	85.71	57.14	42.86
7	-16.70	33.33	0.00	0.00

Table 12. The relative difference between damping ratios estimated via output-only identification methods and base values in direct-typed loading

تحلیل مودال ورودی-خروجی به کمک نرم‌افزار ME' scope [54] انجام گرفته است. جدول (۹) مربوط به بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه دولایه مورد آزمایش بوده که از روش تحلیل مودال ورودی-خروجی تعیین شدند. مطابق این جدول، مقادیر میرایی به‌دست آمده شبکه کم بوده؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار میرایی مربوط به مود اول بوده و برابر $0/62\%$ است.

جدول ۹. نتایج شناسایی شبکه از روش تحلیل مودال ورودی-خروجی

Mode Number	Natural Frequency (Hz)	Damping Ratio (%)
1	7.93	0.62
2	7.97	0.40
3	12.71	0.31
4	71.57	0.14
5	77.20	0.13
6	78.67	0.07
7	101.00	0.06

Table 9. The identification results of the grid using input-output modal analysis

۶-۱- مقایسه بسامدهای طبیعی

نمودارهای مقایسه نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های خروجی-تنها با نتایج متناظر مبنا مربوط به هر دو بارگذاری مستقیم و غیرمستقیم در شکل (۸) قابل مشاهده است. مطابق این نمودار سازگاری مطلوبی میان نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های مختلف وجود دارد.

شکل ۸. نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های مختلف

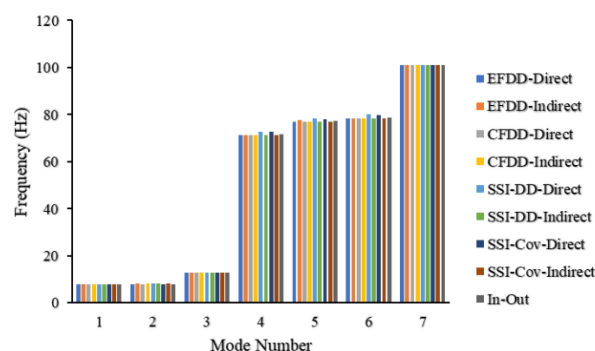


Fig. 8. Natural frequencies identified via various methods

مقدار درصد اختلاف نسبی میان بسامدهای طبیعی شناسایی شده شبکه از سه روش خروجی-تنها با مقدار مبنا از روش تحریک مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. علامت منفی در این جداول نشان دهنده آن است که مقدار تخمین زده شده از روش خروجی-تنها کمتر از مقدار متناظر مبنا است. نتایج تحریک مستقیم نشان می‌دهد که

جدول ۱۳. اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مینا در بارگذاری غیرمستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-22.60	77.42	-24.20	-30.65
2	15.00	-5.00	-25.00	-25.00
3	0.00	9.68	16.13	-12.90
4	21.43	14.29	35.71	28.57
5	61.54	-23.08	23.08	-7.69
6	128.6	71.43	57.14	57.14
7	-16.70	-16.67	50.00	33.33

Table 13. The relative difference between damping ratios estimated via output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

از آنجاکه میرایی نسبت به بسامد طبیعی و شکل مود دارای درجه‌ی عدم قطعیت بالاتری است، پراکندگی نتایج شناسایی‌شده‌ی میرایی قابل پیش‌بینی بود. میرایی شناسایی‌شده‌ی مودهای پایین و در روش تحریک مستقیم از روش خروجی-تنها عمدتاً بیشتر یا مساوی مقدار متناظر مینا است که با نتایج به دست آمده در مراجع [55] و [56] مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند که میرایی شناسایی‌شده خروجی-تنها به دلیل وجود خطاهای تصادفی بیشتر به خصوص در مودهای پایین‌تر، بالاتر از تخمین میرایی از روش ورودی-خروجی است.

مقادیر میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها و روش ورودی-خروجی (In-Out) مربوط به بارگذاری‌های مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، پراکندگی نسبی نتایج میرایی در هر دو نوع بارگذاری مشهود است.

شکل ۹. نمودار میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف تحلیل مودال مربوط به بارگذاری مستقیم

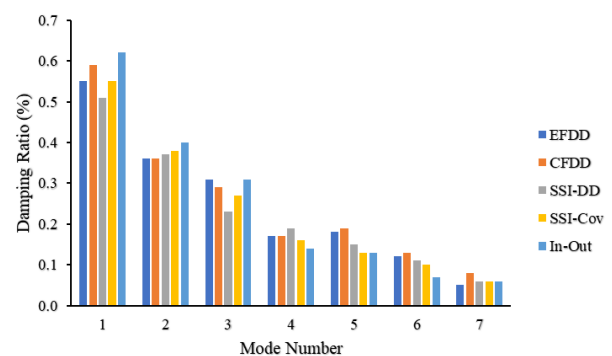


Fig. 9. Damping ratios identified via various methods in direct-typed loading

شکل ۱۰. نمودار میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف تحلیل مودال مربوط به بارگذاری غیرمستقیم

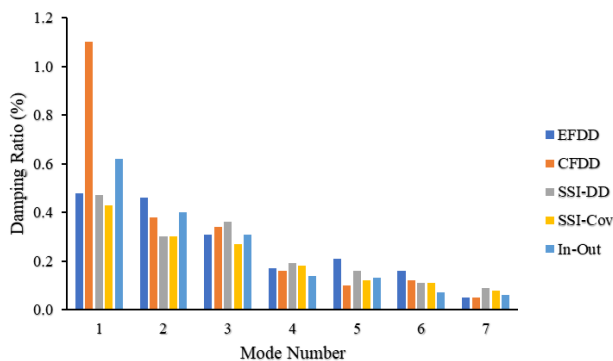


Fig. 10. Damping ratios identified via various methods in indirect-typed loading

۳-۶- مقایسه شکل‌های مودی

برای مقایسه شکل مودهای شناسایی‌شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مینا (روش ورودی-خروجی) از معیار MAC [57] استفاده شده است. مقدار MAC بین هریک از مودهای شناسایی‌شده شبکه از چهار روش EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov با مود متناظر شناسایی‌شده از روش ورودی-خروجی در جداول (۱۴ و ۱۵) ارائه شده است. اعداد نزدیک به یک در این جدول نشان‌دهنده آن است که روش‌های شناسایی خروجی-تنها موفق به شناسایی صحیح شکل مودهای شبکه شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج این دو نوع بارگذاری نشان می‌دهد که مقادیر MAC در بارگذاری غیرمستقیم عمدتاً کمتر یا مساوی مقادیر متناظر از بارگذاری مستقیم می‌باشد که همان‌طور که اشاره شد به دلیل بیشتر بودن انرژی تحریک مودها در بارگذاری مستقیم نسبت به بارگذاری غیرمستقیم است. مطابق این جدول، بیشترین مقدار MAC در هر روش مربوط به مودهای ۳ و ۴ می‌باشد که غیر متقارن هستند.

جدول ۱۴. مقادیر MAC روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مینا در بارگذاری مستقیم

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	0.87	0.89	0.86	0.88
2	0.88	0.89	0.87	0.88
3	0.99	0.99	0.99	0.99
4	0.99	0.98	0.97	0.99
5	0.91	0.90	0.89	0.87
6	0.93	0.93	0.95	0.89
7	0.89	0.90	0.87	0.89

Table 14. The MAC values between output-only identification methods and base values in direct-typed loading

¹ Modal Assurance Criterion

شد. شکل مودهای شبکه نیز با دقت نسبتاً مناسبی شناسایی شدند. اما نسبت‌های میرایی شناسایی شده این شبکه خطای قابل توجهی از خود نشان دادند. همچنین با توجه به نتایج میرایی می‌توان گفت که نتایج مربوط به تحریک مستقیم با خطای کمتری نسبت تحریک غیرمستقیم شناسایی شدند که به دلیل انرژی تحریک بالاتر این نوع بارگذاری بوده است. با توجه به نتایج بسامد طبیعی و شکل مود شناسایی شده می‌توان نتیجه گرفت روش‌های حوزه بسامد EFDD و CFDD دقت بالاتری نسبت به روش‌های حوزه زمان از خود

شکل ۱۱. نمودار MAC بین شکل مودهای روش EFDD و مقادیر متناظر مبنا در بارگذاری مستقیم

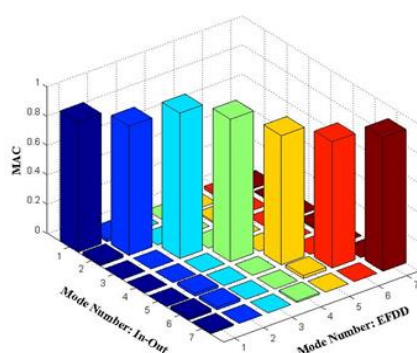


Fig. 11. The MAC diagram between identified mode shapes by EFDD and the corresponding base values in direct-typed loading

شکل ۱۲. نمودار MAC بین شکل مودهای روش EFDD و مقادیر متناظر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم

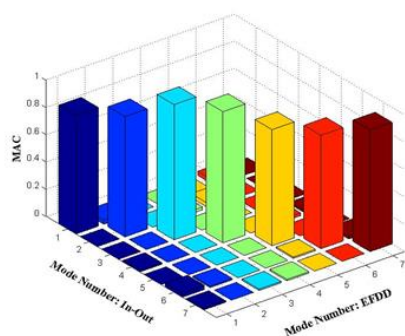


Fig. 12. The MAC diagram between identified mode shapes by EFDD and the corresponding base values in indirect-typed loading

جدول ۱۶. میانگین خطای نسبی (%) بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی و نیز میانگین مقادیر MAC از روش‌های مختلف شناسایی در مقایسه با نتایج متناظر مبنا

Parameter	EFDD		CFDD		SSI-DD		SSI-Cov	
	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect
Natural Frequency	0.21	0.56	0.23	0.49	1.21	0.46	0.91	0.47
Damping Ratio	24.18	37.97	29.7	31.08	22.76	33.04	12.33	27.9
MAC	0.92	0.91	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91

Table 16. The average relative error of natural frequencies and damping ratios as well as MAC values identified via various methods and the corresponding base values

جدول ۱۵. مقادیر MAC روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	0.86	0.87	0.85	0.87
2	0.87	0.88	0.86	0.86
3	0.97	0.99	0.99	0.98
4	0.99	0.98	0.98	0.99
5	0.89	0.89	0.90	0.88
6	0.90	0.92	0.93	0.89
7	0.89	0.89	0.87	0.88

Table 15. The MAC values between output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

برای بررسی درستی شکل‌های مودی شناسایی شده از روش خروجی-تنها باید علاوه بر شرط انطباق، شرط تعامد نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد. اگر مقدار MAC میان یک شکل مود روش خروجی-تنها و شکل مود دیگر از روش ورودی-خروجی صفر یا نزدیک به آن باشد، میان آن دو مود شرط تعامد برقرار است. بدین منظور برای نمونه، نمودار MAC یکی از روش‌های خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) ارائه شده است. اعداد نزدیک به یک روی قطر اصلی و نزدیک به صفر روی سایر خانه‌های ماتریس، بیانگر شناسایی درست شکل مودهای شبکه از روش EFDD می‌باشد.

۴-۶- مقایسه دقت روش‌های مختلف خروجی-تنها

نتایج مربوط به مقایسه دقت روش‌های مختلف خروجی-تنها در شناسایی شبکه دولایه مورد بررسی در جدول (۱۶) ارائه شده است. در این جدول، مقادیر نوشته شده در سطرها مربوط به بسامد طبیعی و نسبت میرایی بیانگر میانگین خطای نسبی ۷ مود اول شناسایی شده شبکه دولایه با روش‌های مختلف خروجی-تنها بوده که در جداول (۱۰ الی ۱۳) ارائه شده بود. همچنین سطر آخر، میانگین مقادیر MAC مودهای مختلف در هر روش را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۱۶) می‌توان گفت که مقادیر بسامد طبیعی با میانگین خطای بیشینه ۱/۲۱٪ نسبت به مقادیر مبنا تخمین زده

نشان داده که در مقایسه با بسامد طبیعی و شکل مودی، پراکندگی نتایج میرایی بسیار بیشتر است. همچنین نتایج نشان داده که مقدار میرایی عمدتاً با افزایش شماره‌ی مود کاهش می‌یابد. مقادیر تخمین زده شده میرایی در بارگذاری مستقیم کمتر از بارگذاری غیرمستقیم می‌باشد. میانگین اختلاف میان نتایج شناسایی روش‌های مختلف خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی نشان داده که با وجود این که روش‌های حوزه بسامد EFDD و CFDD دقت بالاتری در شناسایی بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی شبکه از خود نشان دادند، اما روش‌های حوزه‌ی زمان SSI-DD و SSI-Cov، میرایی را با دقت بالاتری شناسایی نمودند. از بین ۴ روش مورد بررسی، روش SSI-Cov کمترین خطا را در شناسایی نسبت میرایی شبکه دولایه داشت.

۸- مراجع

- [1] Teimouri, H., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. and Khanmohammadi, L., 2021. Damage detection in double layer grids with modal strain energy method and Dempster-Shafer theory. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), pp.253-266.
- [2] Teimouri, H., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. 2020. Detecting damage location and severity in a double layer grid using modal strain energy method and data fusion. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), pp.35-54. Doi: 10.22065/jsce.2018.126917.1518. [In Persian]
- [3] Tüfekci, M., Tüfekci, E. and Dikicioğlu, A., 2020. Numerical investigation of the collapse of a steel truss roof and a probable reason of failure. *Applied Sciences*, 10(21).
- [4] Fu, F. and Parke, G.A.R., 2018. Assessment of the progressive collapse resistance of double-layer grid space structures using implicit and explicit methods. *International Journal of Steel Structures*, 18, pp.831-842. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0030-1>
- [5] Hamid Y. S., Disney P., and Parke G. a R., 2011. Progressive Collapse of Double-Layer Space Trusses. *Conference: IABSE-IASS SYMPOSIUM LONDON*, At London.
- [6] Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A., Nabavian, S.R. and Jahangiry, G.H., 2020. Determining minimum number of required accelerometer for output-only structural identification of frames. *arXiv preprint arXiv:2010.07490*.
- [7] Rainieri, C. and Fabbrocino, G., 2011. Operational modal analysis for the characterization of heritage structures. *GEOFIZIKA*, 28(1), pp.109-126.
- [8] Giraldo, D.F., Song, W., Dyke, S.J. and Caicedo, J.M.,

نشان دادند اما در مورد نسبت میرایی نتیجه عکس اتفاق افتاد. بدین معنا که نسبت میرایی شبکه از روش‌های حوزه زمان با دقت بالاتری شناسایی شدند. در هر دو نوع بارگذاری، میرایی شناسایی شده از روش SSI-Cov کمترین اختلاف را با مقادیر متناظر مبنا دارند که با نتایج مراجع [14 و 32] مطابقت دارد. دقت بالای روش SSI-Cov در تخمین میرایی به دلیل استفاده از کوواریانس داده‌ها در عملیات شناسایی می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

عملیات شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه از یک طرف به دلیل تعداد زیاد المان‌ها و نوع خاص اتصالات آن که دارای رفتاری پیچیده بوده و از طرف دیگر به دلیل نیاز به تعیین شکل مودهای آن به دلیل وجود تعداد زیاد درجات آزادی حائز اهمیت است. در این تحقیق به شناسایی سازه‌ای خروجی-تنهای یک شبکه دولایه با سیستم اتصال گویسان از ۴ روش مختلف EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov پرداخته شد. بدین ترتیب یک شبکه دولایه با سیستم پیوندهای گویسان ساخته شد و تحت آزمایش مودال خروجی-تنها و با دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم قرار گرفت. همچنین به دلیل ارزیابی روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها یک آزمایش مودال ورودی-خروجی نیز انجام گرفت و نتایج آن مبنای مقایسه قرار گرفت.

نتایج به دست آمده نشان داده که هر چهار روش EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov توانستند در هر دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم، بسامدهای طبیعی شبکه دولایه‌ی مورد بررسی را با دقت قابل قبولی شناسایی کنند به طوری که بیشینه اختلاف نتایج تخمین زده شده بین روش‌های خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی مربوط به مود دوم و حدود ۲٪ می‌باشد. نتیجه مشابهی برای شکل مودهای شناسایی شده‌ی شبکه حاصل شد. بدین ترتیب که کمینه مقدار MAC میان شکل مودهای شناسایی شده از روش خروجی-تنها با شکل مود مشابه از روش ورودی-خروجی برابر ۸۵٪ به دست آمد. مقادیر MAC میان شکل مودهای شناسایی شده از روش‌های خروجی-تنها و روش ورودی-خروجی برای مودهای مقارن اول و دوم و نیز پنجم و ششم کمتر از سایر مودها بوده است؛ یعنی شکل مودهای مربوط به این مودها با دقت کمتری شناسایی شدند. نتایج شناسایی شبکه

- modal analysis: A structural health monitoring application to masonry arch bridges. *Structural Control & Health Monitoring*, 29(10).
- [21] Saidin, S.S., Kudus, S.A., Jamadin, A., Anuar, M.A., Amin, N.M., Ibrahim, Z., Zakaria, A.B. and Sugiura, K., 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of ultra-high-performance concrete bridge based on ambient vibration test. *Case Studies in Construction Materials*, 16.
- [22] Providakis, C.P., Mousteraki, M.G. and Providaki, G.C., 2023. Operational modal analysis of historical buildings and finite element model updating using α laser scanning vibrometer. *Infrastructures*, 8(2), p.37.
- [23] Li, B., Wang, P., Zhu, Z., Li, Z. and Xiao, Y., 2024. Ambient Vibration Test and Retest of a Multistory Factory Building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 38(4).
- [24] Civera, M., Sibille, L., Fragonara, L.Z. and Ceravolo, R., 2023. A DBSCAN-based automated operational modal analysis algorithm for bridge monitoring. *Measurement*, 208.
- [25] Huang, K., Yuen, K.V., Ma, Y. and Wang, L., 2024. Online operational modal decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 214.
- [26] Mostafaei, H., Mostofinejad, D., Ghamami, M. and Wu, C., 2023, April. A new approach of ensemble learning in fully automated identification of structural modal parameters of concrete gravity dams: A case study of the Koyuna dam. In *Structures* (Elsevier), 50, pp.255-271.
- [27] Meoni, A., D'Alessandro, A., Mattiacci, M., García-Macías, E., Saviano, F., Parisi, F., Lignola, G.P. and Ubertini, F., 2024. Structural performance assessment of full-scale masonry wall systems using operational modal analysis: Laboratory testing and numerical simulations. *Engineering Structures*, 304.
- [28] Kvåle, K.A., Øiseth, O. and Rønnquist, A., 2017. Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge. *Engineering Structures*, 148, pp.410-423.
- [29] Cabboi, A., Magalhães, F., Gentile, C. and Cunha, Á., 2017. Automated modal identification and tracking: Application to an iron arch bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(1).
- [30] Diord, S., Magalhães, F., Cunha, Á. and Caetano, E., 2017. High spatial resolution modal identification of a stadium suspension roof: Assessment of the estimates uncertainty and of modal contributions. *Engineering Structures*, 135, pp.117-135.
- [31] Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydin, M., Kalkan, E. and Adanur, S., 2018. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions. *Measurement*, 124, pp.260-276.
2009. Modal identification through ambient vibration: comparative study. *Journal of engineering mechanics*, 135(8), pp.759-770. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:8(759).
- [9] Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S., 2017. System Identification of Arch Dams Using Balanced Stochastic Subspace Identification. *Modares Civil Engineering journal*, 17(1), pp.53-64
- [10] Ventura, C.E. and Horyna, T., 2000. Measured and calculated modal characteristics of Heritage Court Tower in Vancouver, BC. *Experimental Techniques*, 24, pp.44-47.
- [11] Kudu, F.N., Uçak, Ş., Osmancikli, G., Türker, T. and Bayraktar, A., 2015. Estimation of damping ratios of steel structures by Operational Modal Analysis method. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, pp.61-68.
- [12] Maliar, L., Kuchárová, D. and Daniel, L., 2019. Operational Modal Analysis of the Laboratory Steel Truss Structure. *Transportation Research Procedia*, 40, pp.800-807.
- [13] Shi, W., Shan, J. and Lu, X., 2012. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient vibration response. *Engineering Structures*, 36, pp.14-26.
- [14] Brownjohn, J.M.W., Raby, A., Bassitt, J., Antonini, A., Hudson, E. and Dobson, P., 2018. Experimental modal analysis of British rock lighthouses. *Marine Structures*, 62, pp.1-22.
- [15] Min, K.W., Kim, J., Park, S.A. and Park, C.S., 2013. Ambient Vibration Testing for Story Stiffness Estimation of a Heritage Timber Building. *The Scientific World Journal*, 2013, pp.1-9
- [16] Shabani, A., Feyzabadi, M. and Kioumars, M., 2022. Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 16.
- [17] Ni, Y.C., Alamdari, M.M., Ye, X.W. and Zhang, F.L., 2021. Fast operational modal analysis of a single-tower cable-stayed bridge by a Bayesian method. *Measurement*, 174.
- [18] Li, J., Bao, T. and Ventura, C.E., 2022. An automated operational modal analysis algorithm and its application to concrete dams. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168.
- [19] Avci, O., Alkhamis, K., Abdeljaber, O., Alsharo, A. and Hussein, M., 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of a 230 m tall tower. *Structure*, 37, pp.154-167.
- [20] Civera, M., Mugnaini, V. and Zanotti Fragonara, L., 2022. Machine learning-based automatic operational

- Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique. In *Conference Proceedings: IMAC-XXVI: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*. Society for Experimental Mechanics.
- [45] Tarinejad, R. and Pourgholi, M., 2015. Processing of Ambient Vibration Results using Stochastic Subspace Identification based on Canonical Correlation Analysis. *Modares Mechanical Engineering*, 15(7), pp.107-118.
- [46] Nabavian, S.R., Davoodi, M.R., Navayi Neya, B. and Mostafavian, S.A., 2020. Effect of noise on output-only structural identification of beams. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), pp.20-34. doi: 10.22065/jsce.2018.130329.1555
- [47] Brincker, R. and Andersen, P., 2006. Understanding stochastic subspace identification. In *Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*. Society for Experimental Mechanics.
- [48] Peeters, B., 2000. System identification and damage detection in civil engineering.
- [49] ARTeMIS Modal 4, Issued by Structural Vibration Solutions AVS. NOVI Science Park, Niles Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark.
- [50] Pashaei, M.H., Davoodi, M.R. and Nooshin, H., 2006. Effects of tightness of bolts on the damping of a MERO-type double layer grid. *International Journal of Space Structures*, 21(2), pp.103-110.
- [51] Park, Y.M. and Kim, K.J., 2013. Semi-active vibration control of space truss structures by friction damper for maximization of modal damping ratio. *Journal of Sound and Vibration*, 332(20), pp.4817-4828.
- [52] Zhang, H., Han, Q., Wang, Y. and Lu, Y., 2016. Explicit modeling of damping of a single-layer latticed dome with an isolation system subjected to earthquake ground motions. *Engineering Structures*, 106, pp.154-165.
- [53] <https://www.dytran.com/Model-5802A-Impulse-Sledge-Hammer-P2578.aspx>
- [54] <https://www.vibetech.com/mescope>
- [55] Avitabile, P., 2006. MODAL SPACE: Someone Told me that Operating Modal Analysis Produces Better Results and that Damping is Much More Realistic. *Experimental Techniques*, 30(6), pp.25-26. doi:10.1111/j.1747-1567.2006.00102.x.
- [56] Lauwagie, T., Van Assche, R., Van der Straeten, J. and Heylen, W., 2006, September. A comparison of experimental, operational, and combined experimental-operational parameter estimation techniques. In *Proceedings of the International Noise and Vibration Conference, ISMA*, pp.2997-3006.
- [57] Allemang, R.J., 2003. The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and vibration*, 37(8), pp.14-23. doi:10.1016/j.chemgeo.2006.02.014.
- [32] Bajrić, A., Høgsberg, J. and Rüdinger, F., 2018. Evaluation of damping estimates by automated operational modal analysis for offshore wind turbine tower vibrations. *Renewable Energy*, 116, pp.153-163.
- [33] Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R., Vaseghi Amiri, J. and Gholampour, S., 2012. Experimental determination of the natural frequencies of a full scale double layer grid with ball joint system. *15th World Conf. Earthq. Eng.*
- [34] Salehi, S., Davoodi, M.R. and Mostafavian, S., 2020. Estimation of Damping for a Double-Layer Grid Using Input-Output and Output-Only Modal Identification Techniques. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(2), pp.295-311. doi: 10.22059/ceij.2019.284169.1594
- [35] Nabavian, S.R., Davoodi, M.R., Navayi Neya, B. and Mostafavian, S.A., 2021. Damping estimation of a double-layer grid by output-only modal identification. *Scientia Iranica*, 28(2), pp.618-628. doi: 10.24200/sci.2019.51919.2424
- [36] Salehi, S., Mostafavian, S.A. and Davoodi, M.R., 2021. Effect of the frequency spacing on modal damping estimation of a double-layer grid. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37(1.1), pp.105-115.
- [37] Davoodi, M.R., Amiri, J.V., Gholampour, S. and Mostafavian, S.A., 2012. Determination of nonlinear behavior of a ball joint system by model updating. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, pp.52-62. doi:10.1016/J.JCSR.2011.11.011.
- [38] Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R. and Amiri, J.V., 2012. Ball joint behavior in a double layer grid by dynamic model updating. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, pp.28-38.
- [39] Magalhães, F., Cunha, Á., Caetano, E. and Brincker, R., 2010. Damping estimation using free decays and ambient vibration tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), pp.1274-1290.
- [40] Orlowitz, E. and Brandt, A., 2017. Comparison of experimental and operational modal analysis on a laboratory test plate. *Measurement*, 102, pp.121-130. doi:10.1016/j.measurement.2017.02.001.
- [41] Brincker, R. and Ventura, C., 2015. *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons.
- [42] Mostafavian, S., Nabavian, S.R., Davoodi, M.R. and Navayi Neya, B., 2019. Output-only modal analysis of a beam via frequency domain decomposition method using noisy data. *International Journal of Engineering*, 32(12), pp.1753-1761. doi: 10.5829/ije.2019.32.12c.08
- [43] Brincker, R., Zhang, L.M. and Andersen, P., 2001. Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), pp.441-445. doi:10.1088/0964-1726/10/3/303.
- [44] Jacobsen, N.J., Andersen, P. and Brincker, R., 2008.

Output-only Structural Identification of a Double-layer Grid with ball joint system

Seyed Rasoul Nabavian^{1,*}, Seyedamin Mostafavian², Bahram Navayi Neya³, Mohammad Reza Davoodi⁴

1. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.
2. Assistant professor, Department of Civil Engineering Payame Noor University, Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshivani University of Technology, Babol, Iran.
4. Associate professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshivani University of Technology Babol, Iran.

* Corresponding Author Email: nabavian@abru.ac.ir

Received: 2024/02/25 - Accepted: 2024/07/10

Abstract

A double-layer grid has a complex behavior due to a large number of elements and a particular type of joints; hence, structural identification of this type of structure is an important issue, which refers to the determination of natural frequencies, mode shapes, and damping ratios. These results are necessary to complete the structural health monitoring, finite element model updating and damage detection. Due to the limitations of input-output methods, modal parameters of civil engineering structures such as bridges, dams, tall buildings, and double layer grids are determined mainly by output-only modal identification. In this work, physical model of a ball jointed double-layer grid with dimensions of 2.8 m at 2.8 m, which is supported on four steel pipes in four corners was made in the laboratory. The grid consists of 32 members connected together with 13 balls, each having ten threaded holes at different angles. Each member consists of a middle pipe and connecting parts including conical piece, sleeve and high strength bolt at both ends of the pipe. The middle pipe has the nominal length, diameter and thickness of 120 cm, 7.64 cm and 0.35 cm, respectively. The horizontal center to center distance of adjacent balls in each layer of the grid is 1.414 m and the total height of the structure includes the column length (1.3 m) and the distance between the top and bottom layers (1 m), which is equal to 2.3 m in total. The approximate weight of the structure is 3532 N. All the members and the balls used in the grid are identical. After all the members of the grid have been assembled, the bolt at each joint is tightened in a series of steps by twisting the corresponding sleeve. Exciting the grid, its acceleration response was measured. The modal parameters were obtained using four output-only modal identification techniques; namely enhanced frequency decomposition (EFDD), curve-fit frequency domain decomposition (CFDD), data-driven stochastic subspace identification (SSI-DD) and covariance-driven stochastic subspace identification (SSI-Cov). Two types of excitations were used in output-only modal tests, namely direct and indirect excitations. Since the modal parameters obtained via input-output modal analysis have less uncertainty compared to the output-only modal analysis techniques, an input-output modal test was also performed and the results are considered as reference values. The results showed that the natural frequencies and mode shapes of the double-layer grid were estimated with a high accuracy via the four methods. The greatest relative difference between the natural frequencies belonged to the second mode and equaled 2.07%. The dispersion of estimated damping was much higher compared to natural frequencies and mode shapes. Among the 4 methods, SSI-Cov had the least error in damping estimation of the double-layer grid. The values of estimated modal damping ratios were relatively low (fraction of 1%). The mean relative error of the identified parameters showed that the time-domain methods estimated the damping ratios with less error; While the frequency-domain methods identified natural frequencies and mode shapes with higher accuracy.

Keywords: Double-layer grid, Structural identification, OMA, Time-domain methods, Frequency-domain methods.