

# مشخصات دینامیکی عرشه‌ی مرکب اگزودرمیک با استفاده از تابع پاسخ بسامدی

حامد اللهیاری (کارشناس ارشد)

مهدی دهستانی\* (استادیار)

مرتضی حسینعلی بیگی (استادیار)

بهرام نوانی نیا (دانشیار)

ابراهیم رحمانی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (ص. ۶۱-۷۰)  
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۱، ص. ۶۱-۷۰

سیستم عرشه‌ی اگزودرمیک از جدیدترین عرشه‌های پل با شبکه‌بندی فولادی است، که در طی دهه‌ی گذشته در پروژه‌های گوناگون به‌کار گرفته شده و ویژگی بارز آن کاهش قابل ملاحظه‌ی وزن سازه نسبت به عرشه‌های بتن‌آرمه‌ی معادل و همچنین افزایش سرعت اجرا با استفاده از عرشه‌های پیش‌ساخته‌ی اگزودرمیک است. در این مطالعه، بسامد ارتعاشی و نیز درصد میراثی عرشه‌ی مرکب اگزودرمیک پل با برش‌گیرهای پرفوبوند به‌طور آزمایشگاهی تعیین شده‌اند. بدین منظور، با تحریک یک نقطه از سازه و اندازه‌گیری مقادیر شتاب و نیرو و تکرار آزمایش در چند مرحله، مقادیر بسامد طبیعی و درصد میراثی با استفاده از تابع پاسخ بسامدی و روش‌های پیک پیکینگ و برازش دایره‌ی نایکوئیست تعیین شده‌اند، که مطابقت مناسبی با مدل‌سازی به روش اجزاء محدود داشته‌اند. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که در بین مودهای مختلف، مود اول غالب است.

allahyari@stu.nit.ac.ir  
dehestani@nit.ac.ir  
m.beygi@nit.ac.ir  
navayi@nit.ac.ir  
ebrahim.rahmani@stu.nit.ac.ir

واژگان کلیدی: پل، پرفوبوند، میرایی، بسامد طبیعی.

## ۱. مقدمه

به دلیل مقاومت بالای سازه‌های فولادی در تحمل تنش‌های کششی و فشاری از یک سو و نیز به دلیل سختی بالای سازه‌های بتنی از سویی دیگر، شرایط مناسبی جهت به‌کارگیری توأم این مصالح، به منظور برطرف کردن نقاط ضعف یکدیگر به‌وجود می‌آید. در صورتی که بتوان ترکیبی از بتن و فولاد را به نحوی مناسب کنار یکدیگر قرار داد، سازه‌ی مرکب با ویژگی‌های سودمند هر دو مصالح به‌دست خواهد آمد. یکی از این سازه‌ها، عرشه‌های مرکب هستند، که مهم‌ترین ویژگی آن‌ها اتصال برشی بین دال بتنی و تیر فولادی است.<sup>[۱]</sup>

یکی از جدیدترین اتصال‌دهنده‌های برشی، اتصال‌دهنده‌های متناوب پرفوبوند است. برش‌گیر نوار پرفوبوند برای اولین بار در اشتهوتگارت ابداع شد.<sup>[۲]</sup> این نوع برش‌گیرها شامل یک صفحه‌ی فولادی همراه با سوراخ‌های تعبیه‌شده در آن است، که باعث ایجاد ریشه‌های بتنی در سوراخ‌ها می‌شود. مکانیزم انتقال برش توسط عملکرد توأم ریشه‌های بتنی و اصطکاک بین صفحه‌ی فولادی و بتن صورت می‌گیرد. مزیت اصلی این برش‌گیرها مقاومت برشی بالا و عملکرد مناسب در فرآیند خستگی است.<sup>[۲]</sup>

\* نویسنده مسئول

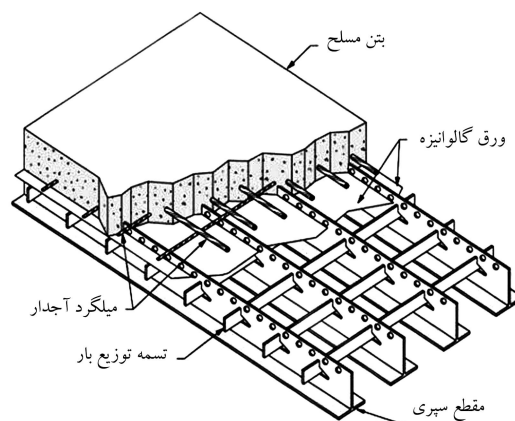
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۴.

چنین سیستم‌هایی در عرشه‌ی اگزودرمیک، که عرشه‌ی مرکب از یک شبکه‌ی فولادی و دال بتنی مسلح است، به طوری که از بیشینه‌ی تنش فشاری بتن و تنش کششی فولاد استفاده شود، کاربرد دارد و تنش‌های برشی افقی توسط سوراخ‌هایی متناوب (یا همان برش‌گیرهای پرفوبوند)، که در قسمت فوقانی و جان سپری تعبیه شده‌اند، در بتن توسعه می‌یابند. در شکل ۱، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی عرشه‌ی اگزودرمیک نشان داده شده است.<sup>[۱]</sup>

عرشه با شبکه‌ی فولادی می‌تواند وزن سازه را بیش از ۵۰٪ نسبت به عرشه‌ی بتن‌آرمه‌ی معمولی کاهش دهد، که کاهش بار مرده به معنای امکان افزایش میزان بار زنده است. استفاده‌ی مؤثر از مصالح در این نوع عرشه باعث کاهش وزن سازه بدون کم‌کردن مقاومت، سختی و عمر مفید سازه می‌شود.<sup>[۲]</sup>

عرشه‌های پیش‌ساخته‌ی اگزودرمیک می‌توانند در مدت زمان کوتاهی از شب و به‌طور کلی زمان‌های کم ترافیک اجرا شوند، که این امر باعث بهره‌برداری مداوم پل در ساعات پر ترافیک روز می‌شود. در مواردی که بتن‌ریزی در محل صورت می‌گیرد، نیز صرفه‌جویی مناسبی در زمان ساخت مشاهده می‌شود، به طوری که شبکه‌های فولادی پس از قرارگیری بر روی شاه‌تیرها آماده‌ی بتن‌ریزی هستند.<sup>[۲]</sup>

در دهه‌ی هفتاد مطالعاتی بر روی نوار برش‌گیر پرفوبوند، که در ابتدا به‌صورت متناوب بر روی بال تیرهای I شکل جوش می‌شد، صورت گرفته است. در پژوهشی



شکل ۱. عرشه‌ی آگرودرمیک همراه با اتصال دهنده‌های برشی پرفوبوند. [۲]

کاهش اثرات آن طراحی می‌شود، لذا داشتن اطلاعاتی در مورد خصوصیات دینامیکی عرشه از جمله: میرایی، بسامد طبیعی، سختی و... ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه پژوهش‌های متعددی در مورد رفتار استاتیک این نوع عرشه‌ها صورت گرفته است، لیکن تاکنون پژوهشی در مورد خصوصیات دینامیکی آن‌ها صورت نگرفته است، که در این مطالعه به آن پرداخته شده است.

### ۳. روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی

از آنجایی که مکانیزم‌های اصلی اتلاف انرژی در بیشتر سیستم‌های عملی کاملاً شناخته شده نیستند، معمولاً تعیین ضریب میرایی به صورت غیر آزمایشگاهی ممکن نیست. در حقیقت، احتمال دارد که مکانیزم اتلاف انرژی به طور واقعی بسیار پیچیده‌تر از نیروی میرایی لزجی باشد، که در فرمول بندی معادله‌ی حرکت یک درجه‌ی آزادی فرض می‌شود. اما معمولاً تعیین یک ویژگی میرایی لزج معادل مناسب، ساده‌تر و تعیین آن ممکن است. روش‌های متداول اندازه‌گیری میرایی عبارت‌اند از:

#### ۱.۳. کاهش ارتعاش آزاد

این روش ساده‌ترین روش تعیین نسبت میرایی لزج ( $\xi$ ) است. هنگامی که سیستم به هر طریق به ارتعاش آزاد در آید، نسبت میرایی را می‌توان از اندازه‌گیری جابجایی‌های  $n$  سیکل فاصله‌ی متوالی تعیین کرد، که در این صورت، نسبت میرایی از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید: [۱۵]

$$\xi = \frac{\delta_n}{2\pi n(\omega/\omega_D)} = \frac{\delta_n}{2\pi n} \quad (1)$$

که در آن،  $\delta_n$ ،  $\omega$  و  $\omega_D$  به ترتیب کاهش لگاریتمی  $n$  سیکل، بسامدهای میرا و نامیرا هستند.

#### ۲.۳. تقویت تشدید

این روش براساس اندازه‌گیری دامنه‌های پایدار پاسخ جابجایی نسبی ایجادشده توسط بارهای هارمونیک جداگانه با دامنه‌ی  $P_0$  در مقادیر گسسته‌ی بسامد تحریک ( $\bar{\omega}$ ) در یک بازه‌ی وسیع شامل بسامد طبیعی استوار است. ترسیم این دامنه‌ها در مقابل بسامد، یک منحنی پاسخ بسامد پدید می‌آورد. از آنجا که قله‌ی پاسخ بسامد برای یک سازه با میرایی پایین کاملاً باریک است، معمولاً لازم است که فاصله‌ی بسامدها، در حوالی قله کوتاه‌تر شود تا شکل بهتری از منحنی به دست آید. ضریب تقویت دینامیکی حقیقی بیشینه،  $D_{max} = \rho_{max}/\rho_0$  که در آن  $\rho_0$  و  $\rho_{max}$  به ترتیب دامنه‌ی پاسخ جابجایی در زمان صفر و بیشینه‌ی دامنه‌ی پاسخ جابجایی هستند، در بسامد تحریک  $\bar{\omega} = \omega \sqrt{1 - 2\xi^2}$  اتفاق می‌افتد و مقدار آن به صورت تقریبی برابر است با  $D_{max} = 1/2\xi$ ، که در این صورت نسبت میرایی را می‌توان از رابطه‌ی ۲ به دست آورد: [۱۵]

$$\xi = \rho_0 / 2\rho_{max} \quad (2)$$

#### ۳.۳. آزمون مودال

آزمون مودال، روشی تجربی برای به دست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی نامغیر با زمان است. مبنای تئوری این روش براساس رابطه‌ی بین پاسخ ارتعاشی

(۱۹۷۱) پیشنهاد شد که اتصال بین شاه تیر فولادی و دال بتنی توسط نوار فولادی جوش شده بر روی بال شاه تیر انجام شود. [۴] در پژوهش دیگری (۱۹۸۷) برای اولین بار نوار برشگیر پرفوبوند توسعه داده شده است. [۴] همچنین پژوهشگران دیگری در همان سال، استفاده از نوار فولادی سوراخ شده بر روی بال فوقانی شاه تیرها را پیشنهاد کرده‌اند. [۵] یک مقایسه‌ی آزمایشگاهی (۱۹۹۲) بین گل‌میخ‌های با سرگرد و برشگیر پرفوبوند نیز نشان داد که نوار برشگیر پرفوبوند دوام بیشتری نسبت به گل‌میخ‌های با سرگرد دارند؛ [۶] و در ادامه، در مطالعات دیگری (۱۹۹۴) تعداد پارامترهای مؤثر در ظرفیت برشی نوار برشگیر پرفوبوند بررسی، [۷] و در پژوهش دیگری (۱۹۹۲) کاربرد پذیری نوار پرفوبوند در تیرهای کامپوزیت نشان داده شده است. [۸] مزایای گزارش شده‌ی این نوع اتصال دهنده‌های برشی، لغزش جزئی تحت بار سرویس، صرفه‌جویی در هزینه‌ی ساخت و بهبود ایمنی در طی مراحل ساخت بوده است. در استرالیا (۱۹۹۵) ایده‌ی مبنی بر حذف بال فوقانی تیر، که نزدیک به تار خنثی بود و در مقاومت خمشی تأثیر چندانی نداشت، ارائه و تعبیه‌ی سوراخ‌ها در جان تیر T شکل جایگزین نوار برشگیر جوش شده بر روی بال فوقانی تیر I شکل شده است. [۹] مطالعات صورت گرفته تا آن زمان، همگی بر روی کاربرد برشگیر پرفوبوند بر روی تیرها متمرکز بوده و برای اولین بار در سال ۲۰۰۱، کاربرد این نوع از برشگیر در عرشه‌ها بررسی شده است. [۱۰] نتایج به دست آمده در مطالعه‌ی مذکور، امکان استفاده از برشگیر پرفوبوند در عرشه‌ها را تأیید کرد و نشان داد که این نوع برشگیرها عملکرد به مراتب بهتری نسبت به گل‌میخ‌های سنتی به ویژه تحت بارهای تکراری و در فرآیند خستگی از خود نشان می‌دهند. [۱۰] در مطالعه‌ی که در سال ۲۰۰۳ صورت گرفت [۱۱] رفتار دینامیکی دال بتنی مقاومت بالا بررسی شد. همچنین برخی از پژوهشگران در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ با استفاده از تابع پاسخ بسامدی مشخصات دینامیکی سازه‌هایی نظیر ریل‌ها و امثالهم را بررسی کردند. [۱۲-۱۳]

در این مطالعه، با ارائه‌ی روشی آزمایشگاهی و استفاده از تابع پاسخ بسامدی FRF، مشخصات دینامیکی عرشه‌ی مرکب آگرودرمیک پل با برشگیرهای پرفوبوند، شامل بسامدهای طبیعی و نیز میرایی به دست آمده است. ویژگی این مطالعه در سادگی نسبی انجام آن و نیز دقت بالای نسبی آن است. علاوه بر این، همه‌ی آزمایش‌ها به صورت غیرمخرب است و می‌تواند در صنعت کاربرد وسیعی داشته باشد.

### ۲. ضرورت تحقیق

با توجه به اینکه همواره عرشه‌ی پل تحت اثر بار دینامیکی قرار گرفته است و برای

دایره‌ی واقعی است. برای یک سیستم یک درجه‌ی آزادی با میرایی و بسکوز، FRF موبیلیتی به صورت رابطه‌ی ۵ است: [۱۶]

$$Y(\omega) = \frac{j\omega}{k - m\omega^2 + j\omega c} \quad (5)$$

قسمت‌های حقیقی و موهومی این عبارت به صورت رابطه‌هایی ۶ و ۷ نوشته می‌شوند:

$$\text{Re}(Y(\omega)) = \frac{\omega^2 c}{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2} \quad (6)$$

$$\text{Im}(Y(\omega)) = \frac{\omega(k - m\omega^2)}{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2} \quad (7)$$

رابطه‌ی ریاضی ۸ به راحتی قابل اثبات است: [۱۶]

$$(\text{Re}(Y(\omega)) - \frac{1}{\gamma c})^2 + (\text{Im}(Y(\omega)))^2 = (\frac{1}{\gamma c})^2 \quad (8)$$

معادله‌ی ۸، مربوط به دایره‌ی بی شعاع  $\frac{1}{\gamma c}$  است. از نظر تئوریک می‌توان ثابت کرد که بسامد طبیعی در مکانی واقع است که نرخ تغییر طول کمان، روی دایره‌ی نایکوئیست، مقدار بیشینه باشد. با تقسیم قسمت موهومی بر قسمت حقیقی نقطه‌ی واقع بر روی دایره‌ی نایکوئیست موبیلیتی در حوالی بسامد طبیعی می‌توان درصد میرایی را از رابطه‌ی ۹ محاسبه کرد: [۱۶]

$$\xi = \frac{\omega_r^2 - \omega^2 \text{Re}(Y(\omega))}{2\omega\omega_r \text{Im}(Y(\omega))} \quad (9)$$

با داشتن مقادیر میرایی، درصد میرایی و بسامد طبیعی می‌توان مقادیر جرم و سختی را از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه کرد: [۱۶]

$$m = \frac{c}{2\xi\omega} \quad (10)$$

$$k = \omega_r^2 m \quad (11)$$

## ۴. مصالح مصرفی

### ۱.۱.۴. سنگدانه‌ها

با توجه به اینکه درصد بالایی از حجم بتن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند، انتخاب نوع درشت‌دانه و بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌ها اهمیت خاصی دارد. آزمایش دانه‌بندی، جهت تعیین نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی دانه‌های سنگی از طریق جدایش به کمک الک براساس استاندارد ASTM C۳۳ [۱۷]، و ASTM C۳۳۰ [۱۸] صورت گرفته است، که نتایج آن به این شرح است:

### ۱.۱.۴.۱. شن

شن مصرفی در این مطالعه از معدنی در آمل، که از نوع مصالح تیرگوشه است، تهیه شده است. وزن مخصوص ظاهری درون اشباع با سطح خشک آن ۲٫۷ و درصد جذب آب آن ۲٫۵ و بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه ۱۲٫۵ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی شن در شکل ۲ ارائه شده است.

### ۲.۱.۴. ماسه

ماسه‌ی مصرفی از نوع رودخانه‌ی، با اندازه‌ی ۰ الی ۵ میلی‌متر است، که میزان نسبت‌های آن به حد مورد نظر استاندارد ASTM C۳۳ رسیده است. وزن مخصوص ظاهری درون اشباع با سطح خشک آن ۲٫۷، درصد جذب آب آن ۳ و مدول نرمی آن ۲٫۸۲ تعیین شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه در شکل ۳ ارائه شده است.

در یک نقطه از سازه با تحریک در همان نقطه و یا نقطه‌ی دیگر، به صورت تابعی از بسامد تحریک است. برای نیروی تحریک  $f(t) = F(\omega)e^{j\omega t}$  که در آن  $t$  زمان،  $\omega$  بسامد زاویه‌ی  $\sqrt{-1} = j$  است، پاسخ سیستم به صورت  $x(t) = X(\omega)e^{j\omega t}$  است؛ که در آن  $X(\omega)$  دامنه‌ی پاسخ است و می‌تواند مختلط باشد. با جای‌گذاری این مقادیر در معادله‌ی حرکت سیستم، می‌توان نسبت پاسخ جابجایی به نیروی ورودی را به صورت رابطه‌ی ۳ نوشت: [۱۶]

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (3)$$

که در آن،  $k$ ،  $m$  و  $c$  به ترتیب سختی، جرم مودال و میرایی سازه هستند. نسبت مذکور، که اغلب به صورت  $\alpha(\omega)$  نمایش داده می‌شود، به تابع پاسخ بسامدی یا FRF سیستم موسوم است، که تابع اصلی مورد استفاده در آنالیز مودال است. با وجود آنکه نمودار FRF به صورت نسبت پاسخ به نیرو تعریف شده است، مشاهده می‌شود که از هر دو مقدار نیرو و پاسخ مستقل است. اگر مقدار میرایی صفر باشد، تابع مختلط FRF به تابعی حقیقی تبدیل خواهد شد. چنانچه FRF، جابجایی را به عنوان پاسخ در نظر گیرد، در این صورت به رسپتانس موسوم است. پاسخ ارتعاشات را می‌توان سرعت یا شتاب نیز در نظر گرفت. نمودار FRF، که سرعت و یا شتاب را به عنوان پاسخ در نظر می‌گیرد، به ترتیب به FRF موبیلیتی و اکسرانس موسوم است. انتخاب مناسب نوع نمایش FRF باعث می‌شود تا مشخصات مورد نظر سیستم در نمودار مورد نظر کاملاً روشن باشد. روش‌های متداول نمایش FRF، نمودار دامنه، نمودار لگاریتمی دامنه، نمودار نایکوئیست و امثالهم است. [۱۶]

### ۱.۳.۳. نمودار دامنه‌ی FRF

ویژگی عمده‌ی نمودار دامنه‌ی FRF، که می‌توان در مقیاس خطی برای هر دو محور بسامد و دامنه رسم شود، آن است که رزونانس را به خوبی نمایش می‌دهد. به همین دلیل، وضوح اطلاعات بخش‌های دیگر نمودار کم می‌شود، زیرا قله‌ی بزرگ رزونانس باعث کوچک جلوه‌دادن سایر بخش‌های منحنی می‌شود. برای رفع این مشکل، معمولاً دامنه‌ی FRF در مقیاس دسی بل رسم می‌شود، که در این مطالعه نیز این مهم مورد توجه قرار گرفته است.

### ۲.۳.۳. پیک پیکینگ

یکی از ساده‌ترین روش‌ها جهت تعیین درصد میرایی و بسامد طبیعی از روی نمودار FRF، روش پیک پیکینگ است. براساس این روش، بسامدهای مربوط به نقاط رزونانس (قله‌های نمودار FRF)، بسامدهای طبیعی سازه  $(\omega_r)$  هستند. اگر بسامدهای نقاطی را که در نزدیکی رزونانس هستند و دامنه‌ی آن‌ها در مقیاس دسی بل، ۳ واحد کمتر از دامنه‌ی نقطه‌ی رزونانس است را،  $\omega_1$  و  $\omega_2$  به نامیم، درصد میرایی از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید: [۱۶]

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_r} \quad (4)$$

ایرادی که می‌توان بر روش پیک پیکینگ وارد دانست، مربوط به مواردی است که تراکم داده‌برداری کم و یا نمودار FRF دارای نویز باشد، که در چنین حالتی دقت روش مورد بحث کاهش می‌یابد. [۱۶]

### ۳.۳.۳. نمودار نایکوئیست

نمودار نایکوئیست قسمت حقیقی FRF را بر حسب قسمت موهومی آن، در صفحه‌ی مختلط نشان می‌دهد. مزیت استفاده از نمودار نایکوئیست، خاصیت دایره‌ی بودن FRF در صفحه‌ی مختلط است. با وجود آنکه تمام نمودارهای نایکوئیست رسپتانس، موبیلیتی و اکسرانس دایره‌ی به نظر می‌رسند، فقط نمودار نایکوئیست موبیلیتی

## ۶. وسایل مورد استفاده در انجام آزمایش

جهت تعیین تابع پاسخ بسامدی عرشه‌ها لازم است که سازه توسط نیرویی مشخص تحریک شود. اعمال این تحریک به وسیله‌ی چکش مودال یا لرزاننده ممکن است. در این مطالعه، عرشه‌ها به وسیله‌ی چکش مودال با وزن ۳۳۰ گرم ساخت شرکت APT مدل ۱ AU تحریک شدند (شکل ۴ الف). پاسخ سازه به وسیله‌ی شتاب‌سنج ساخت شرکت Djv مدل A/۱۲۰/V اندازه‌گیری شده است (شکل ۴ ب). چرم شتاب‌سنج ۱۸ گرم است، که به علت سبکی، از چرم آن صرف‌نظر شده است. جهت ثبت داده‌های ارتعاشی (تحریک و شتاب) نیز از دستگاه داده‌گیری Brüel & Kjør استفاده شده است (شکل ۵). دستگاه داده‌گیری دارای ۴ کانال ورودی و ۲ کانال خروجی است. از کانال‌های ورودی برای ثبت نیرو و شتاب و از کانال‌های خروجی می‌توان برای تحریک لرزاننده استفاده کرد. برای ارتباط بین دستگاه داده‌گیری مورد استفاده و کامپیوتر نیز از نرم‌افزار و  $\mu\text{Pulse}$  Brüel & Kjør استفاده شده است. داده‌ها پس از ذخیره‌سازی به نرم‌افزار Microsoft Office Excel منتقل و پردازش در محیط این نرم‌افزار انجام شده است.

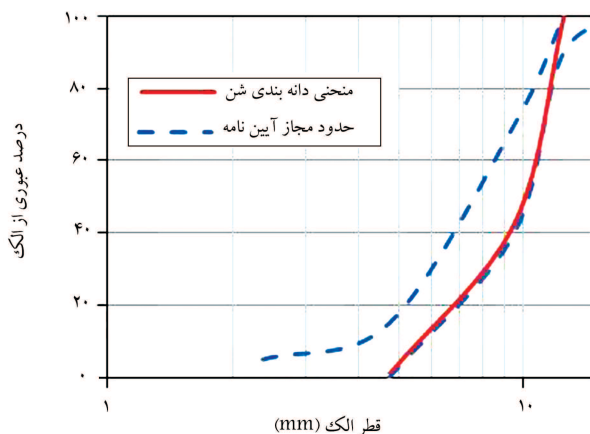


الف) چکش مودال؛ ب) شتاب‌سنج.

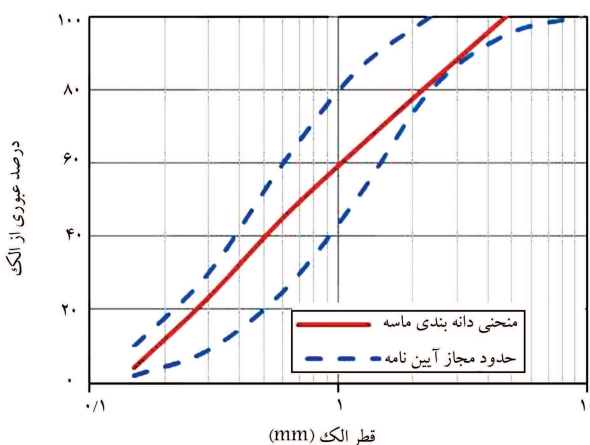
شکل ۴. وسایل اعمال نیرو و مثبت پاسخ سازه.



شکل ۵. دستگاه داده‌گیری Brüel & Kjør رایانه.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی شن مصرفی و حدود استاندارد ASTM.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی و حدود استاندارد ASTM.

## ۲.۴. سیمان

انتخاب صحیح نوع سیمان در تولید بتن بسیار مهم است. سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ II محصول کارخانه‌ی سیمان نکا، دارای وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص به روش بلین  $6 \text{ m}^2/\text{gr}$  / ۳۰۰ بوده است. گیرش اولیه‌ی سیمان ۱۷۵ دقیقه و گیرش ثانویه‌ی آن نیز ۲۳۰ دقیقه است.

## ۵. طرح اختلاط

طرح اختلاط به گونه‌ی در نظر گرفته شده است که علاوه بر ارضاء اسلامپ مورد نظر جهت عبور خمیر سیمان از سوراخ‌های برش‌گیر پرفوبند، مقاومت مناسبی نیز داشته باشد، که جزئیات آن در جدول ۱ آمده است.

اسلامپ بتن ساخته شده با طرح اختلاط فوق ۸۰ میلی‌متر، مقاومت نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر در زمان آزمایش (۶۰ روزه) ۵۷٫۳۸ مگاپاسکال و مدول کشسانی به دست آمده از نمونه‌های استوانه‌ی، ۲۹۴٫۱۷ Gpa است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن ساخته شده ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

آب	سیمان	درشت دانه	ریزدانه	وزن مخصوص خشک
۲۱۱	۴۵۰	۹۴۰	۷۶۰	۲۴۰۰

میلگردها (میلگرد ۱۶ با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال به فواصل ۱۰ سانتی‌متر در جهت طولی و میلگرد ۱۰ با تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال به فواصل ۱۵ سانتی‌متر در جهت عرضی) مطابق شکل ۹ بر روی مقاطع فولادی قرار داده شدند و با توجه به موقعیت اتصال دهنده‌های برشی، ضخامت بتن ۹/۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، به طوری که کمترین تنش‌های افقی در تراز اتصال دهنده‌های برشی پرفوبند ایجاد شود.

### ۲.۷. تعیین مشخصات دینامیکی عرشه‌ها

جهت انجام تست مودال و تعیین خصوصیات دینامیکی، عرشه‌ها مطابق شکل ۱۰ به‌وسیله ی طناب از دو فنر آویزان شدند، به طوری که اثر تکیه‌گاه تا حد ممکن خنثی



شکل ۹. عرشه‌ی اگزودرمیک آماده‌ی بتن‌ریزی.

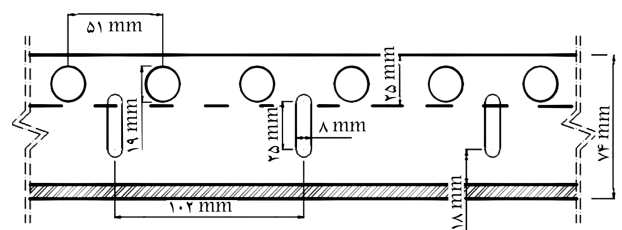


شکل ۱۰. نمونه‌ی از عرشه‌ی اگزودرمیک آویزنده از دو فنر.

## ۷. برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۱.۷. آماده‌سازی نمونه‌های عرشه

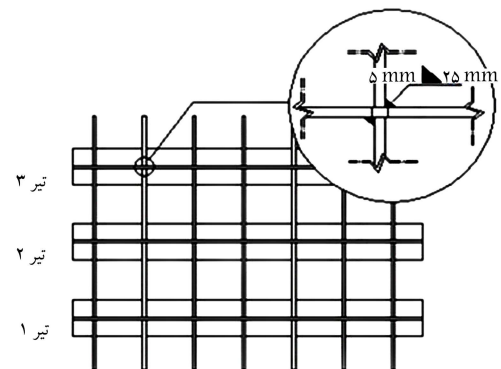
به منظور تعیین مشخصات دینامیکی عرشه‌ی اگزودرمیک، ۳ مدل آزمایشگاهی از آن‌ها هر یک به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و پهنای ۹۰ سانتی‌متر ساخته شده است. مقاطع فولادی از برش تیر آهن نمره‌ی ۱۶ توسط سنگ فرز تهیه و سپس سوراخ‌هایی به قطر ۱۹ میلی‌متر به فواصل ۵۱ میلی‌متر در قسمت فوقانی و سوراخ‌های لوبیایی شکل به ابعاد ۸ × ۲۵ میلی‌متر به فواصل ۱۰۲ میلی‌متر در جان مقطع فولادی توسط دستگاه فرز ایجاد شده است (شکل ۶). مقاطع فولادی به فواصل ۳۳ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شدند (شکل ۷) و تسمه‌های فولادی به ضخامت ۶ میلی‌متر و پهنای ۲۵ میلی‌متر از داخل سوراخ‌های لوبیایی شکل عبور داده شده و به جان مقطع سپری جوش داده شده است (شکل ۸). سپس ورق‌های گالوانیزه به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بین مقاطع فولادی، بر روی تسمه‌ها قرار داده شدند. شبکه‌ی بافته‌شده از



شکل ۶. جزئیات سوراخ‌های ایجادشده در مقطع سپری.



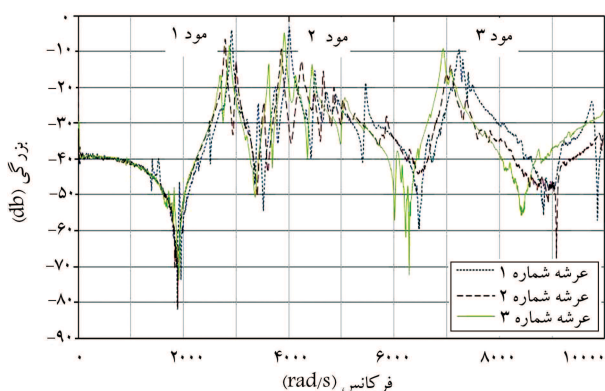
شکل ۷. نحوه‌ی قرارگیری تسمه‌های توزیع بار و مقاطع سپری.



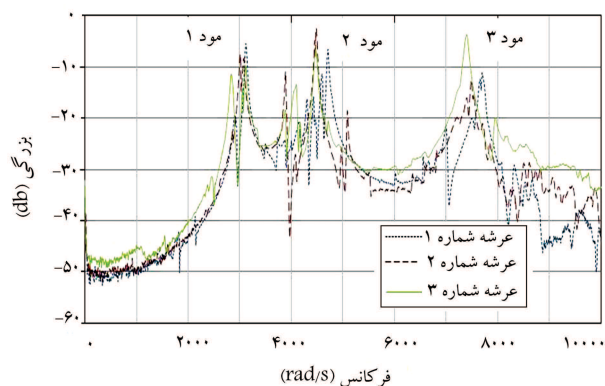
شکل ۸. جزئیات جوش تسمه‌ها به مقاطع سپری.



شکل ۱۱. تحریک عرشه توسط چکش مودال در نقاط تحریک ۱ و ۲.



شکل ۱۲. نمودار بسامد - دامنه‌ی FRF عرشه‌ها در نقطه‌ی تحریک ۱.



شکل ۱۳. نمودار بسامد - دامنه‌ی FRF عرشه‌ها در نقطه‌ی تحریک ۲.

شود (جهت انتخاب سختی مناسب فنرها ابتدا در نرم‌افزار اجزاء محدود عرشه‌ی موردنظر با سختی فنر صفر مدل‌سازی و سپس سختی فنر افزایش داده شده است و با توجه به اینکه بسامد اولین مود خمشی در دو حالت اختلافی کمتر از ۲۰٪ داشته‌اند، انتظار می‌رود که سختی فنرها بر روی نتایج آزمایشگاهی تأثیر چشم‌گیری نداشته باشند). پس از معالفت کردن عرشه‌ها، از یک چکش مودال جهت تحریک آن‌ها در ۲ نقطه استفاده شده است. نقاط تحریک ۱ و ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. جهت افزایش دقت از میانگین ۵ ضربه‌ی چکش در هر نقطه‌ی تحریک استفاده شده است، همچنین شتاب‌سنج در کلیه‌ی تحریک‌ها در نقطه‌ی ۱ قرار داشته است. داده‌های FRF، نسبت شتاب به نیرو، به صورت عدد مختلط توسط دستگاه داده‌گیری ثبت و پس از پردازش توسط نرم‌افزار اکسل، نمودار بسامد - دامنه FRF رسم شده است، که در آن محور افقی بسامد، در مقیاس خطی و محور قائم دامنه‌ی FRF، در مقیاس دسی‌بل هستند. نمودار بسامد - دامنه‌ی FRF برای نقاط تحریک ۱ و ۲، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

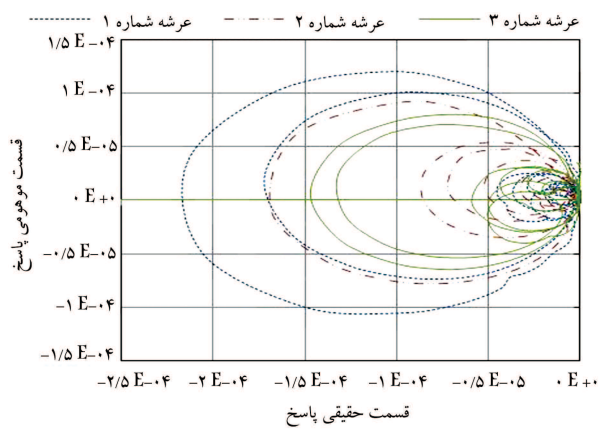
همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، مزیت اصلی استفاده از مقیاس دسی‌بل برای دامنه، نمایش نقاط آنتی رزونانس و کمینه علاوه بر نقاط رزونانس است. جهت تشخیص بهتر قله‌های رزونانس از قله‌هایی که در اثر نویز ایجاد شده‌اند، می‌توان از مجموع نمودارهای عرشه‌های شماره‌ی ۱ تا ۳ استفاده کرد، همچنین با مقایسه‌ی نمودارهای نقاط تحریک ۱ و ۲ هر عرشه می‌توان برآورد دقیق‌تری از نقاط رزونانس و یا نویز به دست آورد. این تذکر لازم است که بسامدهای مربوط به نقاط رزونانس، در واقع همان بسامدهای طبیعی سازه هستند.

جهت محاسبه‌ی درصد میرایی می‌توان از روش پیک پیکینگ و نیز دایره‌ی نایکوئیست استفاده کرد. در صورت استفاده از روش پیک پیکینگ لازم است بسامدهای  $\omega_1$ ،  $\omega_2$  و  $\omega_3$  از روی نمودارهای بسامد - دامنه‌ی FRF تعیین و با جای‌گذاری در رابطه‌ی ۴، درصد میرایی تعیین شود. برای سازه‌ی مورد بررسی در این مطالعه، نتایج محاسبات روش یادشده برای ۳ مد دارای بیشترین مقدار دامنه در قله‌های رزونانس، که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، در جدول ۲ ارائه شده است، که در آن متوسط میرایی از میانگین‌گیری نتایج در دو نقطه‌ی ۱ و ۲، مطابق شکل ۱۱ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که درصد میرایی حدود ۰٫۵٪ است، که مقدار کم آن را می‌توان به عدم استهلاک انرژی از طریق لقی اتصالات یا ایجاد ترک در سازه و امثالهم که معمولاً مکانیزم‌های عمده‌ی استهلاک انرژی هستند، نسبت داد.

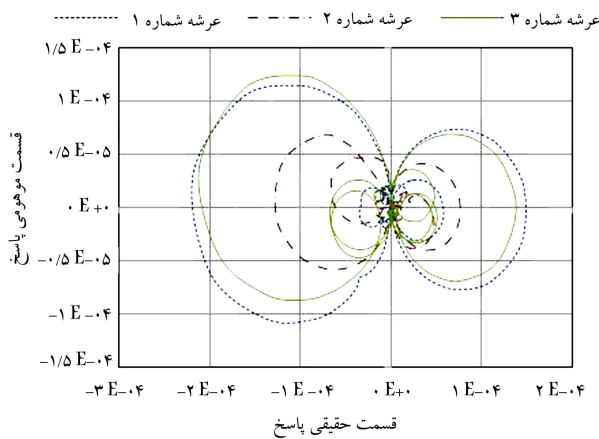
با توجه به وجود قله‌های نزدیک به هم در نمودار بسامد - دامنه‌ی FRF، انتظار می‌رود روش پیک پیکینگ دارای خطا باشد، بنابراین بهتر است جهت افزایش دقت از نمودار نایکوئیست نیز در کنار روش پیک پیکینگ استفاده کرد.

جدول ۲. بسامد طبیعی و درصد میرایی عرشه‌ها با استفاده از روش پیک پیکینگ.

شماره‌ی عرشه	متوسط بسامد (rad/sec)			متوسط نسبت میرایی (ε)		
	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۱	مود ۲	مود ۳
یک	۲۹۱۰	۴۰۱۰	۷۱۱۵	۰٫۰۰۰۴۴	۰٫۰۰۰۴۴	۰٫۰۰۰۴۸
دو	۲۷۹۰	۳۸۶۰	۷۰۳۵	۰٫۰۰۰۵۴	۰٫۰۰۰۵۸	۰٫۰۰۰۵۰
سه	۲۸۷۰	۳۹۱۰	۶۹۶۵	۰٫۰۰۰۵۸	۰٫۰۰۰۴۴	۰٫۰۰۰۴۴
میانگین	۲۸۵۶٫۶۷	۳۹۲۶٫۶۷	۷۰۳۸٫۳۳	۰٫۰۰۰۵۲	۰٫۰۰۰۴۹	۰٫۰۰۰۴۷



شکل ۱۴. نمودار نایکوئیست موبیلیتی عرشه‌های ساخته شده (نقطه‌ی تحریک ۱).



شکل ۱۵. نمودار نایکوئیست موبیلیتی عرشه‌های ساخته شده (نقطه‌ی تحریک ۲).

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، در میان نمودارهای نایکوئیست رسیتانس، موبیلیتی و اکسرانس، فقط نمودار نایکوئیست موبیلیتی، دایره‌ی کامل است، بنابراین برای رسم دایره‌ی نایکوئیست نیاز به داده‌های FRF موبیلیتی است و این در حالی است که آنچه توسط دستگاه داده‌گیری ثبت شده است، FRF اکسرانس است، اما از آنجایی که شتاب، مشتق سرعت نسبت به زمان است؛ لذا، جهت تعیین FRF موبیلیتی کافی است FRF اکسرانس را بر  $\omega$  تقسیم کرد. پس از به دست آوردن FRF موبیلیتی و ترسیم قسمت حقیقی و موهومی آن در برابر هم، دایره‌های نایکوئیست موبیلیتی ایجاد می‌شوند، که نتایج آن در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، هر دایره مربوط به یک مود ارتعاشی و قطر آن برابر با معکوس مقدار میرائی (c) است، با توجه به قطر دایره‌های نایکوئیست، مقادیر میرائی در جدول ۳ نشان داده شده است. جهت محاسبه‌ی ضریب میرائی نیز می‌توان از رابطه‌ی ۹ استفاده کرد، که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. با داشتن c،  $\xi$  و  $\omega$  و استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ می‌توان مقادیر جرم و سختی را محاسبه کرد، که نتایج حاصله در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روش برازش دایره‌ی نایکوئیست، همانند روش پیک پیکینگ، مد اول بیشترین درصد میرائی را به خود اختصاص می‌دهد.

جهت مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آزمون مودال با نتایج تئوری اجزاء محدود، نمونه‌ی از عرشه‌ی اگزودریمیک با ابعاد مورد استفاده در آزمایش توسط برنامه‌ی اجزاء محدود تحت شرایط مرزی آزاد مدل‌سازی شده است، که از میان مودهای شکل‌گرفته، ۸ شکل مودی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همچنین نتایج مربوط به بسامدهای مودهای مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۶ و نیز شکل‌های مودی نشان می‌دهند که ۴ مود اول مربوط به حرکت انتقالی صلب جسم و ۲ مود بعدی مربوط به دوران صلب جسم حول محور افقی و از مود هفتم به بعد مربوط به ارتعاش خمشی عرشه‌ی پل است، علاوه بر این، بسامدهای ردیف‌های ۸، ۱۰ و ۲۱ در جدول ۶ و نتایج به دست آمده به صورت

جدول ۳. بسامد طبیعی و میرایی عرشه‌ها با استفاده از روش دایره‌ی نایکوئیست.

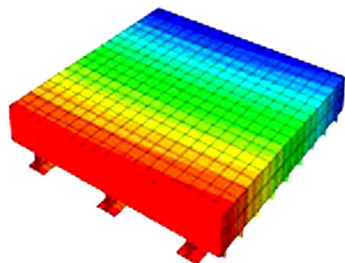
شماره‌ی عرشه	متوسط بسامد (rad/sec)			متوسط میرایی (c)		
	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۱	مود ۲	مود ۳
یک	۲۹۱۰٫۳۶	۴۰۰۴٫۰۶	۷۲۲۱٫۱۱	۴۶۲۶٫۷۳	۶۳۶۹٫۸۵	۲۵۰۰۰
دو	۲۷۸۸٫۳۱	۳۸۴۹٫۶۶	۷۰۰۷٫۵	۶۸۹۹٫۷۲	۱۲۴۹۴٫۵	۱۴۶۹۵
سه	۲۸۶۳٫۲۵	۳۹۰۹٫۲۵	۶۹۴۱٫۸	۶۱۶۷٫۲۱	۷۰۱۶٫۱۰	۱۶۹۴۹٫۱۵
میانگین	۲۸۵۳٫۹۷	۳۹۲۰٫۹۹	۷۰۵۶٫۸۰	۵۸۹۷٫۸۸	۸۶۲۶٫۸۲	۱۸۸۸۱٫۳۴

جدول ۴. بسامد طبیعی و درصد میرایی عرشه‌ها با استفاده از روش دایره‌ی نایکوئیست.

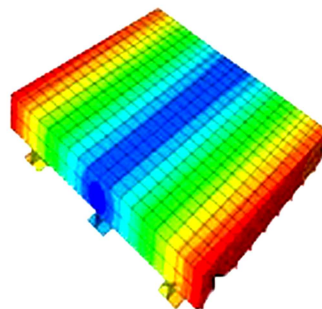
شماره‌ی عرشه	متوسط بسامد (rad/sec)			متوسط نسبت میرایی (ξ)		
	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۱	مود ۲	مود ۳
یک	۲۹۱۰٫۳۶	۴۰۰۴٫۰۶	۷۲۲۱٫۱۱	۰٫۰۰۰۵۵	۰٫۰۰۰۴۵	۰٫۰۰۰۵۵
دو	۲۷۸۸٫۳۱	۳۸۴۹٫۶۶	۷۰۰۷٫۵	۰٫۰۰۰۶۶	۰٫۰۰۰۵۴	۰٫۰۰۰۵۶
سه	۲۸۶۳٫۲۵	۳۹۰۹٫۲۵	۶۹۴۱٫۸	۰٫۰۰۰۶۷	۰٫۰۰۰۶۶	۰٫۰۰۰۴۸
میانگین	۲۸۵۳٫۹۷	۳۹۲۰٫۹۹	۷۰۵۶٫۸۰	۰٫۰۰۰۶۱	۰٫۰۰۰۵۵	۰٫۰۰۰۵۳

جدول ۵. جرم مودال و سختی عرشه‌ها با استفاده از داده‌های دایره نایکوئیست.

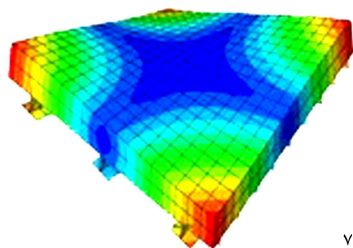
شماره‌ی عرشه	متوسط جرم مودال (kg)			متوسط سختی ( $\text{kg}/\text{sec}^2$ )		
	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۱	مود ۲	مود ۳
میانگین	۱۶۹,۳۹	۲۰۰,۰۱	۲۵۲,۴	۱۳۷۹۷۰۶۰۷۱	۳۰۷۴۹۸۶۲۵۸	۱۲۵۶۹۱۲۲۷۸۳



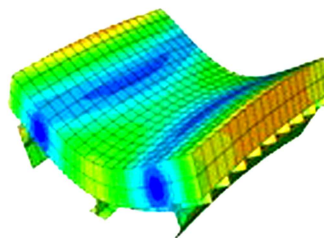
مود ۱



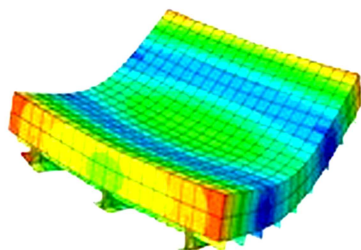
مود ۵



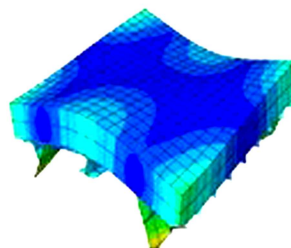
مود ۷



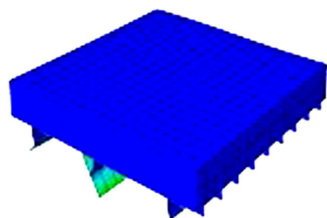
مود ۸



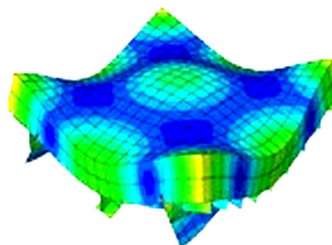
مود ۹



مود ۱۰



مود ۱۱



مود ۲۱

شکل ۱۶. برخی از شکل‌های مودی به‌دست‌آمده از برنامه‌ی اجزاء محدود.



جدول ۶. بسامدهای محاسبه شده توسط برنامه‌ی اجزاء محدود.

Fre (rad/s)	Mode No.
۰	۱
۱۱,۴۴ E - ۰۴	۲
۱۷,۰۲ E - ۰۴	۳
۲۱,۵۵ E - ۰۴	۴
۳۱۲,۵۶	۵
۳۸۶,۰۹	۶
۱۶۰,۱/۵۳	۷
۲۸۸۶,۱۰	۸
۳۵۸۳,۴۳	۹
۳۹۰,۱/۰۱	۱۰
۴۱۱۸,۱۷	۱۱
۴۲۱۳,۶۹	۱۲
۴۲۳۱,۴۶	۱۳
۴۴۴۰,۱۵	۱۴
۴۵۰۳,۵۸	۱۵
۴۶۰۵,۲۵	۱۶
۴۶۲۵,۳۵	۱۷
۵۵۴۹,۲۰	۱۸
۵۵۶۴,۷۷	۱۹
۵۵۸۸,۵۱	۲۰
۷۱۹۲,۴۸	۲۱
۷۷۶۸,۳۶	۲۲
۸۰۶۴,۷۸	۲۳
۸۱۵۵,۸۴	۲۴
۸۱۶۴	۲۵

تجربی در این مطالعه، که در جدول‌های ۲ الی ۴ ارائه شده‌اند، نزدیک هستند و درصد خطا برای مودهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۰۶ و ۰/۲۰ است، علاوه بر این از مقایسه‌ی جدول ۶ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز می‌توان به اختلاف کم نتایج بسامدها به روش اجزاء محدود و به دست آمده در این مطالعه پی برد، این تذکر لازم است که برخی از شکل‌های مودی از جمله مودهای ۷ و ۹ در جدول ۶، در روش تجربی به دلیل اثر تکیه‌گاهی طنابی که جهت آویزان کردن عرشه از فدر استفاده شده است، با دامنه‌ی کمتری شکل گرفته‌اند. بهتر می‌بود جهت افزایش هرچه بیشتر دقت نتایج آزمایشگاهی عرشه‌ها به صورت نقطه‌یی معلق می‌شدند، که به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی و پایداری سازه این امر میسر نشده است. به هر حال با مقایسه‌ی نتایج تجربی و تحلیلی، نتایج قابل قبولی در بیشتر مودها دیده شده است.

## ۸. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مشخصات دینامیکی عرشه‌ی اگزودرمیک پل با برش‌گیرهای پرفوبند به روش تجربی پیک پیکینگ و دایره‌ی نایکوئیست تعیین شده است. میانگین نتایج به دست آمده از روش پیک پیکینگ و دایره‌ی نایکوئیست برای ابعاد به کار گرفته شده‌ی عرشه‌ی پل برای بسامدهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲۸۵۵,۳۲، ۳۹۲۳,۸۳ و ۴۷,۵۶ و نیز برای درصد میرایی در این مودها به ترتیب ۰/۰۵۷، ۰/۰۵۲ و ۰/۰۵۰ به دست آمده‌اند. نتایج حاصله به دو روش پیک پیکینگ و دایره‌ی نایکوئیست برای بسامد، تقریباً بر هم منطبق هستند که با روش اجزاء محدود تطابق خوبی دارد. علاوه بر این نسبت میرایی حاصل از روش پیک پیکینگ و دایره‌ی نایکوئیست نشان می‌دهد که نتایج قدری با یکدیگر اختلاف دارند، که روش دایره‌ی نایکوئیست به دلیل برازش دایره‌یی منطبق بر مقادیر قرائت شده حاصل از آزمایش نسبت به روش پیک پیکینگ دقت بالاتری دارد.

## منابع (References)

- Chromiak, P. and Studnicka, J. "Load capacity of perforated shear connector", *Pollack Periodica*, **1**(3), pp. 23-30 (2006).
- The D.S. Brown Company, "An Introduction to: Exodermic™ Bridge Decks", (2007). <http://www.exodermic.com/docs/pdf/brochure/Exorev.pdf>
- Nishimura, A., Okumura, T. and Ariga, Y. "Shear connector utilizing the reinforcing steels in composite girder slab", *Proc., Symp. on New Techniques in Constr. of Struct.*, 17th Nat. Symp. on Bridge and Struct. Engrg., Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo, pp. 35-47 (1971).
- Leonhardt, F., Andrä, H.P. and Harre, W. "Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit", *Beton und Stahlbetonbau*, **12**, pp. 325-331 (1987).
- Zellner, W. "Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors", *Compos. Constr. in Steel and Concrete, Proc. Engrg. Found. Conf.*, New England College, Henniker, N. H., pp. 240-252 (1987).
- Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. "Behaviour of perfobond rib shear connectors in composite beams: Full-size tests", *Can. J. Civil Eng.*, **19**(2), pp. 224-235 (1992).
- Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. "A parametric study of perfobond rib shear connectors", *Can. J. Civ. Eng.*, Ottawa, **21**(4), pp. 614-625 (1994).
- Velanda, M.R. and Hosain, M.U. "Behavior of perfobond rib shear connectors: Push-out tests", *Can. J. Civ. Eng.*, Ottawa, **19**(1), pp. 1-10 (1992).
- Roberts, W. and Heywood, R. "Development and testing of a new shear connector for steel concrete composite bridges", 4th Int. Bridge Engrg. Conf., National Academy Press, Washington, D.C., pp. 137-145 (1995).

10. Higgins, C. and Mitchell, H. "Behavior of composite bridge decks with alternative shear connectors", *Journal of Bridge Engineering*, **6**(1), pp. 17-22 (2001).
11. Pavic, A. and Reynolds, P. "Modal testing and dynamic FE model correlation and updating of a prototype high-strength concrete floor", *Cement & Concrete Composites*, **25**(7), pp. 787-799 (2003).
12. Kaewunruen, S. and Remennikov, A. "Application of experimental modal testing for estimating dynamic properties of structural components", Faculty of Engineering – Papers, University of Wollongong (2005).
13. Remennikov, A. and Kaewunruen, S. "Determination of dynamic properties of rail pads using instrumented hammer impact technique", *Acoustics Australia* (2004).
14. Ahn, S.J., Jeong, W.B. and Yoo, W.S. "Unbiased expression of FRF with exponential window function in impact hammer testing", *Journal of Sound and Vibration*, **277**(4), pp. 931-941 (2004).
15. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Computers & Structures, McGraw-Hill, New York (2003).
16. He, J. and Fu, Z.-F., *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann (2001).
17. American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM C33.
18. American Society for Testing and Materials, ASTM C330.