

مطالعه پارامتری پاسخ‌های طولی و عرضی دودکش‌های بتن آرمه بلند در برابر باد با تحلیل حوزه فرکانس

هوشیار ایمانی کله سر^{۱*}، نهمت خدائی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندس عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

دودکش‌های صنعتی بلند سازه‌هایی حساس در برابر بارهای دینامیکی باد می‌باشند. آیین‌نامه‌ها عموماً روابطی تقریبی را جهت تخمین پاسخ سازه‌های بلند در برابر این بارها ارائه می‌دهند، با این حال تعیین دقیق پاسخ سازه‌های حساس و لاغر را مستلزم تحلیل دینامیکی می‌دانند. در این تحقیق، پاسخ‌های دینامیکی دودکش‌های بتنی بلند با محدوده ارتفاعی ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر در مقابل ارتعاشات تصادفی باد، با روش تحلیل حوزه فرکانس مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اینکه در این نوع سازه‌ها مود خمشی غالب می‌باشد، لذا سازه دودکش به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی مدل گردیده است. کلیه مراحل مدلسازی و تحلیل شامل المان‌بندی سازه، تعیین ماتریس انتقال، محاسبه ماتریس‌های تابع طیفی نیروهای طولی و عرضی باد و انتگرال‌گیری عددی جهت تعیین پاسخ در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل ارتفاع دودکش، نسبت قطر فوقانی به قطر تحتانی آن، سرعت مبنای باد و ناحیه قرارگیری دودکش در پاسخ‌های طولی و عرضی سازه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد ضریب تغییرات پاسخ طولی دودکش‌ها با افزایش سرعت مبنای باد و زبری سطح زمین افزایش می‌یابد. پاسخ عرضی دودکش‌های مورد مطالعه در محدوده سرعت مبنای ۱۰ الی ۲۰ متر بر ثانیه به مقدار اوج خود می‌رسد. کاهش نسبت قطر فوقانی دودکش به قطر تحتانی آن، به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخ عرضی سازه را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: پاسخ عرضی باد، پاسخ طولی باد، دودکش‌های بلند، تحلیل حوزه فرکانس، ماتریس تابع انتقال.

* نویسنده مسئول: هوشیار ایمانی کله سر

پست الکترونیکی: hek@uma.ac.ir

شناسه دیجیتال DOI: 10.22065/jsce.2017.72448.1051

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.72448.1051>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۱

۱- مقدمه

دودکش‌های صنعتی به منظور تخلیه مواد آلاینده در ارتفاعی دور از سطح زمین به کار برده می‌شوند. توسعه کارخانجات و سختگیرانه‌تر شدن استانداردهای کنترل آلودگی هوا، موجب افزایش ارتفاع دودکش‌های صنعتی گردیده است. با توجه به محتوای فرکانسی طیف سرعت باد، سازه‌های بلند و لاغر در مقابل نیروی دینامیکی باد حساس می‌باشند. افزایش ارتفاع دودکش‌ها لاغرتر و حساس‌تر شدن آنها را در مقابل بارهای دینامیکی باد در پی داشته است. این سازه‌ها به دلیل شرایط هندسی خاص، با سایر سازه‌های بلند تفاوت داشته و محاسبه پاسخ دینامیکی آنها در برابر باد، مستلزم استفاده از ضوابط و فرآیندهای خاصی می‌باشد. اثر نیروهای باد بر سازه بلند، در دو امتداد طولی یا جهت وزش باد و عرضی یا عمود بر امتداد وزش باد، مورد بررسی قرار گرفته است. نیروی طولی از دو مولفه استاتیکی و دینامیکی تشکیل می‌شود که مولفه استاتیکی یا نیروی پسا متناسب با مجذور سرعت مبنای باد و مولفه دینامیکی متاثر از نوسانات سرعت طولی باد می‌باشد. پاسخ سازه در جهت عرضی غالباً در اثر تحریک ریزش گردبادی در ناحیه پشت سازه اتفاق می‌افتد.

اکثر آیین‌نامه‌ها از مفهوم ضریب تندباد به عنوان اثر معادل استاتیکی برای محاسبه تاثیر نیروی طولی باد استفاده می‌نمایند. ضریب تندباد به صورت نسبت پاسخ دینامیکی ماکزیمم به پاسخ استاتیکی تعریف می‌شود. روش ضریب تندباد، فرآیندی تخمینی است که بر مبنای مود اول تغییر شکل سازه و خواص مهندسی باد در یک ارتفاع موثر، استوار است. این روش برای نخستین بار توسط داونپورت معرفی گردید [۱] و سپس طی مطالعات متعددی مورد بازنگری قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعات ویکری [۲] و سولاری [۳ و ۴] اشاره نمود. روش مذکور به دلیل سادگی و عمومیت، در اکثر آیین‌نامه‌ها گنجانده شده است. منون و راثو [۵] لنگر خمشی ناشی از نیروهای طولی باد در دودکش‌های بتن‌آرمه را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آیین‌نامه‌های مختلف را مقایسه نمودند و پراکندگی قابل توجهی در روش‌های موجود مشاهده کردند. کیچوسکی و کریم [۶] نتایج تحلیل اثر دینامیکی باد بر اساس آیین‌نامه‌ها و استانداردها را با نتایج آزمایش تونل باد مورد مقایسه قرار دادند. برخی دیگر از مطالعات به بررسی تاثیرات نیروهای طولی باد بر روی ساختمان‌های بلند و مقایسه روش‌های آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مطرح بین‌المللی در این زمینه پرداخته‌اند [۷-۸].

نیروی عرضی دودکش‌های بتنی بلند، غالباً از ریزش گردبادی در ناحیه پشت سازه حادث می‌شود. پاسخ سازه ناشی از این پدیده به عوامل متعددی از قبیل عدد رینولدز، عدد استروهل، انحراف معیار و طیف ضریب عرضی نیروی باد، و خصوصیات هندسی و فیزیکی سازه وابسته می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع و همچنین پیچیده بودن آن، مطالعات زیادی جهت استخراج پارامترها و مبانی محاسباتی پاسخ عرضی باد انجام گرفته است. ویکری و کلارک [۹] پاسخ عرضی دودکش‌های با مقطع متغیر را مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای موثر را معرفی نمودند. ویکری و باسو [۱۰ و ۱۱] رابطه ساده شده‌ای را برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های با مقطع دایره‌ای ارائه دادند. بر اساس مطالعه مذکور، پاسخ تخمینی محاسبه شده بر اساس روابط توصیه شده، خطای قابل قبولی در مقایسه با نتایج تحلیل عددی نشان می‌داد. منون و راثو [۱۲] روش‌های آیین‌نامه‌ای برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های بتن‌آرمه را مورد مطالعه قرار دادند و شرایطی را که پاسخ عرضی نسبت به پاسخ طولی تعیین‌کننده‌تر می‌باشد تشریح نمودند. آروناچالام [۱۳] رابطه نیمه تجربی را برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های بلند ارائه نمود. روابط نیمه تجربی ارائه شده، بر اساس مشاهدات تجربی دیگری توسط آروناچالام و لاکشمنان [۱۴] مورد بازنگری قرار گرفت. روش پیشنهادی به عنوان روشی ساده برای تخمین جابجایی بالای دودکش‌های بتن‌آرمه و فولادی توصیه گردید.

ارزیابی پاسخ دقیق سازه مستلزم تحلیل دینامیکی است که با در نظر گرفتن طیف نیروهای طولی و عرضی باد و مشخصات دینامیکی سازه در سراسر ارتفاع آن انجام می‌پذیرد. با توجه به فرآیند نسبتاً پیچیده و حجم محاسباتی بالای تحلیل دینامیکی، اکثر تحقیقات مربوط به پاسخ سازه‌های بلند در برابر باد، بر مبنای روابط آیین‌نامه‌ای و یا روابط ارائه شده در سایر مطالعات انجام می‌گیرد. در این پژوهش، پاسخ دودکش‌های بتنی بلند در مقابل نیروهای دینامیکی عرضی و طولی باد با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس سیستم چند درجه آزادی تعیین گردیده است. با توجه به رفتار غالب خمشی دودکش‌های بتن‌آرمه بلند، سازه دودکش به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با المان‌های تیر مدل‌سازی شده و ماتریس تابع انتقال سازه تعیین گردیده است. ماتریس تابع طیفی نیروهای طولی و عرضی باد برای حالت‌های مختلف، بر اساس طیف‌های متداول تعیین شده و پاسخ سازه بر مبنای تئوری ارتعاشات تصادفی محاسبه گردیده است. تاثیر پارامترهای مختلف بر روی

پاسخ، از قبیل ارتفاع دودکش، نسبت قطر فوقانی به تحتانی، سرعت مبنای باد، و ناحیه قرارگیری دودکش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل تحلیلی و ماتریس تابع انتقال

مدل سازه دودکش‌های بتن‌آرمه بلند تحت بار جانبی مشابه تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در نظر گرفته شده است. این مدل رفتاری در مطالعات متعددی برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند در برابر باد به کار گرفته شده است [۱۵-۱۸]. معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

که در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C} ، و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، \mathbf{X} بردار جابجایی‌های گرهی و \mathbf{F} بردار نیروهای خارجی می‌باشد. ماتریس سختی المان تیر نسبت به جابجایی و دوران دو انتهای المان به صورت زیر است:

$$\mathbf{K}_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن E ، I و L به ترتیب مدول یانگ، ممان اینرسی تیر و طول المان تیر می‌باشند. با ادغام ماتریس‌های سختی المان تیر در ماتریس سختی کل سیستم می‌توان نوشت:

$$\mathbf{K}^m = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{K}_{tr} \\ \mathbf{K}_{rt} & \mathbf{K}_{rr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه فوق، اندیس t مربوط به حرکات انتقالی و r دوران گرهی می‌باشد در این ماتریس کلیه درجات آزادی انتقالی در قسمت بالا آورده شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات مربوط به استخراج ماتریس انتقال سیستم، از روش تراکم درجات آزادی استفاده شده است. با تراکم درجات آزادی دورانی در حرکات انتقالی گره‌ها، ماتریس سختی کاهش یافته سیستم به شکل زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$\mathbf{K}_{red}^m = \mathbf{K}_{tt} - \mathbf{K}_{tr}\mathbf{K}_{rr}^{-1}\mathbf{K}_{rt} \quad (4)$$

ماتریس جرم متناظر با سیستم تراکم یافته، ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن، همان جرم‌های متمرکز گرهی می‌باشند:

$$\mathbf{M}_{red}^m = \text{diag}[m_i^m] \quad (5)$$

ماتریس میرایی ذاتی سازه پس از تحلیل مودال سازه و محاسبه اشکال، جرم‌ها و فرکانس‌های مودی از روش زیر قابل تعیین می‌باشد:

$$\mathbf{C}^m = \boldsymbol{\Phi}^{-T} \mathbf{A} \boldsymbol{\Phi}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}[2\mu_1\zeta_1\omega_1 \quad \dots \quad 2\mu_j\zeta_j\omega_j \quad \dots \quad 2\mu_n\zeta_n\omega_n]$$

که در آن $\boldsymbol{\Phi}$ ماتریس اشکال مودی و μ_j ، ζ_j و ω_j به ترتیب جرم، میرایی و فرکانس‌های مودی و \mathbf{A} ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن میرایی‌های مودی می‌باشند.

ماتریس تابع انتقال بین جابجایی‌های سازه و نیروهای خارجی با تبدیل فوریه معادله (۱) به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega) = (-\omega^2\mathbf{M} + j\omega\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1}\mathbf{F}(\omega) \quad (7)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای و z واحد موهومی می‌باشد. $H(\omega)$ ماتریس تابع انتقال و یا ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نامیده می‌شود. تفسیر فیزیکی ماتریس تابع انتقال را به این شکل می‌توان بیان نمود: درایه (k, j) این ماتریس بیانگر پاسخ فرکانسی سیستم در درجه آزادی k به‌ازای نیروی تحریک هارمونیک با دامنه واحد و فرکانس ω در درجه آزادی j ام می‌باشد [۲۰].

ماتریس تراکم طیفی پاسخ برای سیستم چند درجه آزادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_x(\omega) = H(\omega)S_f(\omega)H^*(\omega) \quad (8)$$

که در آن $H(\omega)$ ماتریس تابع انتقال سیستم و علامت * بیان‌کننده ترانپوز ماتریس و $S_f(\omega)$ ماتریس تراکم طیفی نیروی تحریک می‌باشد. در نهایت، واریانس پاسخ جابجایی و شتاب سازه برای درجه آزادی i ام با استفاده از انتگرال عددی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$E[x_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad \text{and} \quad E[\ddot{x}_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad (9)$$

که در آن $S_{x_{ii}}(\omega)$ عضو i ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد.

۳- خصوصیات مهندسی باد و طیف‌های نیروهای دینامیکی باد

۳-۱- پروفیل سرعت متوسط باد و نیروی استاتیکی باد

تغییرات سرعت میانگین باد در لایه مرزی اتمسفر عموماً با قانون توانی بیان می‌شود که حالت عمومی رابطه آن به شکل زیر می‌باشد:

$$U(z) = aU_0\left(\frac{z}{b}\right)^\alpha \quad (10)$$

در رابطه فوق a ، b و α پارامترهای ناحیه‌ای و U_0 سرعت مبنای باد می‌باشد که در اکثر آیین‌نامه‌ها به‌عنوان مقدار سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متر در ناحیه باز، با یک دوره بازگشت معین تعریف می‌شود. جدول ۱ ناحیه بندی مناطق تعریف‌شده استاندارد باد، و ضرائب قانون توانی را براساس آیین‌نامه کانادا [۲۱] نشان می‌دهد.

نیروی استاتیکی ناشی از مولفه سرعت میانگین باد برای واحد طول ارتفاع سازه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$f_w = \frac{1}{2} \rho_a U(z)^2 C_d B \quad (11)$$

که در آن ρ_a دانسیته هوا، $U(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع z ، C_d ضریب پسا و B عرض سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد می‌باشد.

جدول ۱: ناحیه بندی مناطق تعریف‌شده استاندارد باد، و ضرائب قانون توانی را براساس آیین‌نامه کانادا [۲۱]

ناحیه	توصیف ناحیه	a	b (m)	α	ارتفاع گرادین
A	ناحیه باز با درختان یا ساختمان‌های پراکنده	۱	۱۰	۰/۱۴	۲۶۵
B	نواحی جنگلی یا حومه شهر با تعداد محدود و پراکنده ساختمان‌های بلند	۰/۷۰۷	۱۲/۷	۰/۲۵	۳۱۷
C	مرکز شهرهای بزرگ دارای ساختمان‌های بلند با تراکم بالا	۰/۶۳۲	۳۰	۰/۳۶	۳۸۳

۳-۲- طیف نیروی طولی باد

مولفه نوسانی نیروی طولی باد در واحد ارتفاع از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_D(z, t) = \rho_a U(z) u(z, t) C_d B \quad (12)$$

که در آن $u(z, t)$ سرعت نوسانی باد در ارتفاع Z و سایر پارامترها مشابه رابطه (۱۱) می‌باشند. مولفه نوسانی سرعت طولی باد، یک فرآیند تصادفی است که تابع تراکم طیفی نیروی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_{fD}(\omega) = \rho_a^2 \bar{U}^2 B^2 C_d^2 S_u(\omega) \quad (13)$$

که $S_u(\omega)$ طیف تراکم سرعت نوسانی در جهت طولی باد و \bar{U} سرعت میانگین باد می‌باشد. داونپورت با تمرکز بر روی محدوده فرکانسی موثر در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، رابطه زیر را برای تابع تراکم نوسانات سرعت طولی باد ارائه کرده است [۱]:

$$S_u(\omega) = \frac{2u_*^2}{|\omega|} \frac{\left(\frac{600\omega}{\pi u_{10}}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{600\omega}{\pi u_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} \quad (14)$$

که در آن $u_* = \sqrt{\kappa} u_{10}$ سرعت اصطکاکی باد، u_{10} سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متری در ناحیه مورد نظر، و κ ضریب پسای سطحی است که وابسته به زبری ناحیه می‌باشد و مقدار آن برای نواحی باز، حومه شهر و مراکز شهرهای بزرگ به ترتیب 0.05 ، 0.15 و 0.5 توصیه شده است. همبستگی نوسانات سرعت باد بین دو نقطه، با افزایش فاصله آنها کاهش می‌یابد. ویکری رابطه دوبعدی زیر را برای تابع همبستگی سرعت باد پیشنهاد داده است [۲]:

$$coh_{jk}(\omega) = \exp \left\{ \frac{-|\omega| \sqrt{c_z^2 (z_j - z_k)^2 + c_y^2 (y_j - y_k)^2}}{2\pi \frac{1}{2} [\bar{U}(z_j) + \bar{U}(z_k)]} \right\} \quad (15)$$

که در آن y و z به ترتیب مختصات افقی و ارتفاعی نقاط، ω فرکانس زاویه‌ای، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین در ارتفاع Z و c_z و c_y ضرایب ثابتی هستند که مقادیر آنها برای کاربردهای مهندسی به ترتیب ۱۶ و ۱۰ توصیه شده است.

۳-۳- طیف نیروی عرضی باد ناشی از ریزش گردبادی

با عبور جریان از اطراف هر جسم هواوند، جریان‌های گردابی یا پیچک‌هایی در ناحیه پشت، در طرفین جسم شکل می‌گیرد. ریزش این جریانها باعث تغییر الگوی فشار اطراف جسم و ایجاد نیروی عرضی می‌گردد. نیروی عرضی باد در واحد ارتفاع سازه دودکش، ناشی از عامل فوق، از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$F_s(z, t) = \frac{1}{2} \rho_a C_L(z, t) D(z) U^2(z) \quad (16)$$

که در آن $D(z)$ و $U(z)$ به ترتیب قطر خارجی دودکش و سرعت میانگین باد در ارتفاع Z و $C_L(z, t)$ ضریب نیروی عرضی باد یا ضریب برا می‌باشد. با توجه به رابطه فوق طیف نیروی عرضی باد در واحد طول سازه به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{F_s}(z, n) = \left[\frac{1}{2} \rho_a D(z) U^2(z) \right]^2 S_{C_L}(z, n) \quad (17)$$

$S_{C_L}(z, n)$ طیف ضریب نیروی عرضی باد بوده و براساس مطالعات تجربی انجام گرفته با تابع گوسی قابل تخمین می‌باشد [۱۱]:

$$\frac{S_{C_L}(z, n)}{C_L^2} = \frac{1}{\sqrt{\pi} B n_s} \exp \left[- \left(\frac{1 - \left(\frac{n}{n_s}\right)}{B} \right)^2 \right] \quad (18)$$

که در آن \bar{C}_L^2 واریانس ضریب نیروی عرضی و B پارامتری است که پراکندگی یا عرض باند طیف را نشان می‌دهد. n_s فرکانس ریزش گردبادی بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n_s = \frac{S_t U(z)}{D(z)} \quad (19)$$

S_t عدد استروغال می‌باشد. نحوه تعیین پارامترهای آیرودینامیکی B ، S_t و \bar{C}_L در ادامه تشریح می‌شود. رابطه زیر برای عرض باند B پیشنهاد داده شده است [۸]:

$$B^2 = B_0^2 + 2I_z^2 \quad (20)$$

B_0 عرض باند مربوط به جریان آرام می‌باشد که مقدار آن 0.05 تا 0.1 توصیه شده است (در این مطالعه 0.08 در نظر گرفته شده است) و I_z شدت تلاطم می‌باشد که رابطه عمومی آن برای نواحی و آیین‌نامه‌های مختلف به صورت زیر پیشنهاد داده شده است [۷]:

$$I_z = c(z/10)^\alpha \quad (21)$$

در رابطه فوق c و α پارامترهای ناحیه‌ای می‌باشند. مقادیر C برای نواحی باز، حومه و داخل شهر براساس آیین‌نامه کانادا [۲۱] به ترتیب 0.51 ، 0.27 و 0.16 استخراج شده است. پارامتر α همان مقدار توان در پروفیل سرعت باد می‌باشد.

ضریب \bar{C}_L تابعی از عدد رینولدز، زبری سطح بیرونی دودکش، و نسبت لاغری یا همان ارتفاع به قطر دودکش است که با توجه به مشخصات ابعادی دودکش‌های مورد مطالعه و محدوده تغییرات سرعت باد، از رابطه زیر قابل تعیین می‌باشد [۹]:

$$\bar{C}_L = d \left\{ 0.15 + 0.035 \left[5 + \log_{10} \left(\frac{k}{D} \right) \right]^2 \right\} \quad (22)$$

$$d = 0.8 + 0.05 \left[\frac{h}{D(h)} - 8 \right] \leq 1.0 \quad (23)$$

که در آن k پارامتری است که اندازه زبری سطح دودکش را نشان می‌دهد و برای دودکش‌های بتن‌آرمه مقدار آن را می‌توان معادل زبری ماسه برابر یک میلی‌متر در نظر گرفت [۹].

با توجه به مقادیر عدد رینولدز برای دودکش‌های بتنی مورد مطالعه، عدد استروغال از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_t = c \left\{ 0.23 - 0.007 \left[5 + \log_{10} \left(\frac{k}{D} \right) \right] \right\} \quad (24)$$

$$c = 0.736 + 0.012 \left[\frac{h}{D(h)} - 8 \right] \leq 1.0 \quad (25)$$

پاسخ عرضی محاسبه شده براساس مبانی فوق، مقدار اسمی پاسخ می‌باشد و نتیجه حاصله بایستی با در نظر گرفتن پدیده آیروالاستیکی اصلاح شود. برای این منظور در محاسبات انجام گرفته در این پژوهش، میرایی آیرودینامیکی سازه که دارای مقدار منفی می‌باشد مطابق روش ارائه شده در مرجع [۲۲] محاسبه و پاسخ عرضی سازه براساس آن اصلاح گردیده است.

۴- خصوصیات دودکش‌های بتن آرمه مورد مطالعه

به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی طولی و عرضی دودکش‌های بتن آرمه بلند در برابر باد، دودکش‌هایی با محدوده ارتفاعی ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر مورد نظر قرار گرفتند. سایر خصوصیات ابعادی دودکش‌ها مطابق جدول ۲ که در مطالعه [۵] ارائه شده، انتخاب گردیدند. در جدول مذکور پارامترهای D_b و D_t به ترتیب قطرهای تحتانی و فوقانی دودکش و t_b و t_t به ترتیب ضخامت‌های تحتانی و فوقانی دودکش می‌باشند. ابعاد مورد نظر نماینده مناسبی از شرایط واقعی دودکش‌های بتن آرمه بلند موجود می‌باشد. برای یک ارتفاع مشخص دودکش h ، مقادیر قطرهای تحتانی و فوقانی دودکش و ضخامت‌های بالا و پایین آن از جدول ۲ قابل استخراج می‌باشد به طور مثال برای دودکش با ارتفاع ۳۰۰ متر، قطرهای تحتانی و فوقانی دودکش به ترتیب برابر ۲۵ و ۱۵ متر و ضخامت‌های تحتانی و فوقانی دودکش به ترتیب ۱/۰ و ۰/۴ متر می‌باشد. پس از استخراج ضخامت تحتانی و فوقانی، تغییرات ضخامت دودکش با ارتفاع به صورت سهمی درجه ۲ در نظر گرفته شد. سرعت مبنای باد تا ۴۰ متر بر ثانیه و ناحیه قرارگیری سازه از ناحیه باز تا مراکز شهری (یا مناطق صنعتی بزرگ توسعه یافته) فرض گردید. دانسیته هوا $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ، میرایی دودکش برای همه مودها یک درصد، و مدول الاستیسیته بتن $E_c = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ منظور گردید. ضریب پسا براساس آیین‌نامه کانادا تابعی از نسبت ارتفاع به قطر موثر دودکش (h/D_e) تعریف شده است [۲۱] به نحوی که مقدار ضریب پسا به صورت میانمایی خطی بین اعداد ۰/۶ و ۰/۷ به ترتیب مربوط به نسبت‌های ارتفاع به قطر موثر ۷ و ۲۵ تعیین می‌گردد. مقدار قطر موثر D_e برای دودکش‌های با مقطع متغیر، براساس توصیه آیین‌نامه، برابر قطر میانگین در یک سوم ارتفاع فوقانی دودکش می‌باشد.

جدول ۲: پارامترهای ابعادی دودکش‌ها

پارامتر دودکش	محدوده عملی	مقدار انتخاب شده
نسبت لاغری h/D_b	۱۷-۷	۱۲
نسبت قطرها D_t/D_b	۰/۱-۳/۰	۰/۶
نسبت قطر به ضخامت در پای دودکش D_b/t_b	۳۵-۱۵	۲۵
نسبت ضخامت بالای دودکش به ضخامت پای آن t_t/t_b	۰/۰-۲/۶	۰/۴

۵- ارزیابی پاسخ استاتیکی و دینامیکی دودکش‌ها

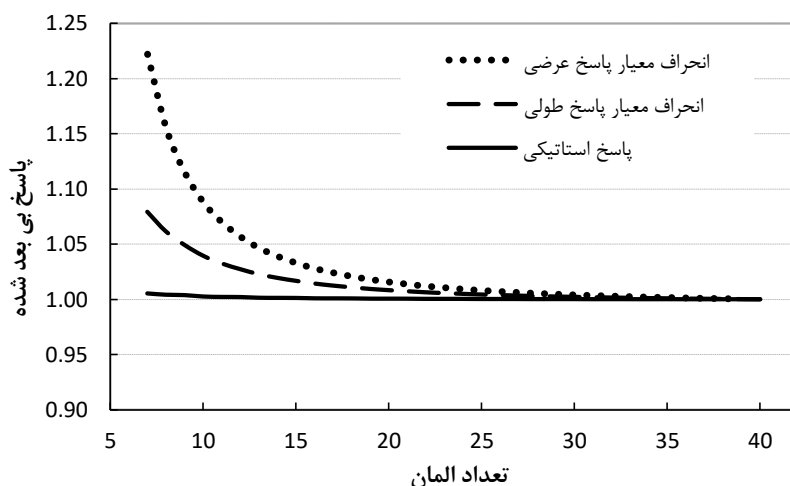
به منظور ارزیابی پاسخ دودکش‌ها، ماتریس سختی کلی سازه برای هر دودکش، با استفاده از روابط ۲ تا ۴ محاسبه گردید. با استفاده از روش تراکم بیان شده در بخش ۲ درجات آزادی دورانی گره‌ها در درجات آزادی انتقالی تراکم شد و ماتریس‌های سختی و جرم و میرایی تراکم یافته سازه تعیین گردیدند. فرکانس‌های طبیعی دودکش‌های بتن آرمه مورد مطالعه برای چهار ارتفاع ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متر و سه مود ارتعاشی نخست در جدول ۳ ارائه شده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل تعداد المان سازه، ارتفاع دودکش، سرعت مبنای باد و نسبت قطر فوقانی به تحتانی دودکش در پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه و همچنین طیف‌های طولی و عرضی باد در ادامه تشریح شده است.

جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی دودکش‌های بتن آرمه

ارتفاع دودکش (متر)	فرکانس‌های طبیعی (هرتز)		
	n_1	n_2	n_3
۱۰۰	۰/۶۲	۲/۸۶۷	۷/۳۲۵
۲۰۰	۰/۳۵۱	۱/۴۹۵	۳/۷۴۰
۳۰۰	۰/۲۳۴	۰/۹۹۷	۲/۴۹
۴۰۰	۰/۱۷۵	۰/۷۴۷	۱/۸۷

۵-۱- تاثیر تعداد المان‌ها در پاسخ سازه

تاثیر تعداد المان‌های مدل سازه در پاسخ‌های جابجایی استاتیکی و انحراف معیار جابجایی طولی و عرضی بالای دودکش ۴۰۰ متری، واقع در ناحیه A به‌ازای سرعت مبنای ۴۰ متر بر ثانیه در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه بهتر همگرایی، پاسخ‌ها با تقسیم بر پاسخ متناظر با سازه دارای ۴۰ المان بی‌بعد شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌گردد پاسخ استاتیکی دارای سرعت همگرایی بیشتری می‌باشد و منحنی آن برای سازه‌های دارای بیش از ۱۰ المان به‌صورت افقی در می‌آید. پاسخ‌های طولی و عرضی سازه به پارامترهای بیشتری شامل فرکانس‌های طبیعی و ماتریس انتقال سازه، و توابع طیف نیروی باد در گره‌ها و همبستگی بین آنها وابسته می‌باشند و سرعت همگرایی کمتری دارند. با این حال، تغییرات این پاسخ‌ها برای مدل‌های دارای بیش از ۳۰ المان، ناچیز و قابل اغماض می‌باشد و به‌همین دلیل در تحلیل استاتیکی و دینامیکی در پژوهش حاضر تعداد ۳۰ المان برای مدلسازی سازه در نظر گرفته شده است.



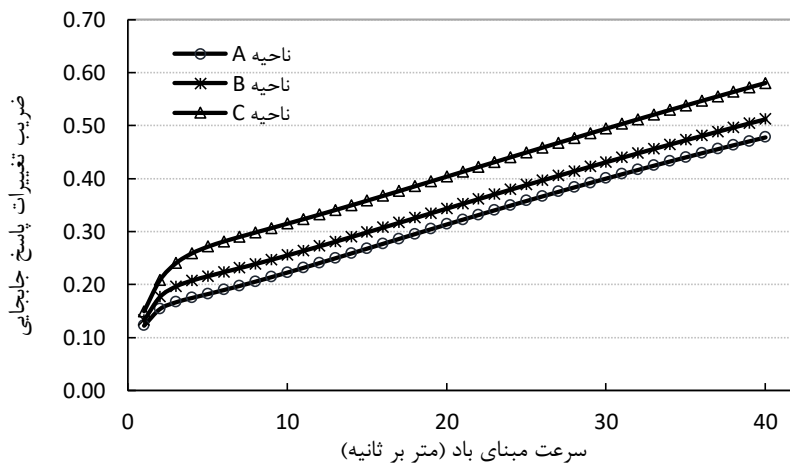
شکل ۱: تاثیر تعداد المانها بر پاسخ دودکش ۴۰۰ متری واقع در ناحیه A با سرعت مبنای باد ۴۰ متر بر ثانیه.

۵-۲- ضریب تغییرات پاسخ جابجایی طولی

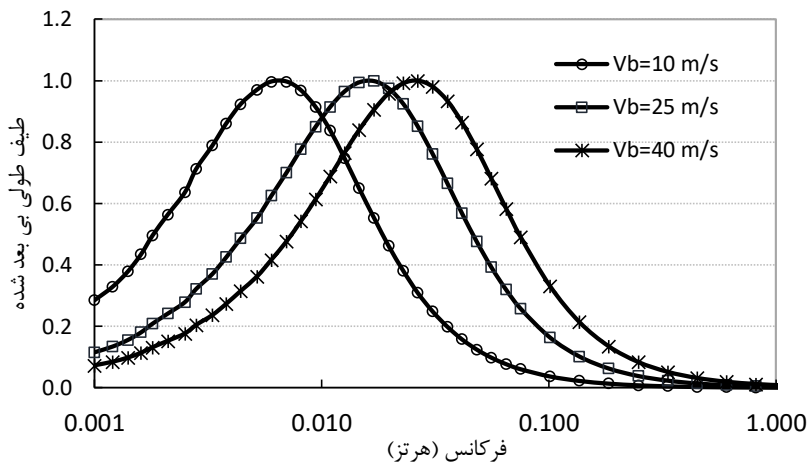
ضریب تغییرات به‌صورت نسبت انحراف معیار مولفه دینامیکی به مولفه استاتیکی پاسخ تعریف می‌شود. ضریب تندباد که مبنای آیین‌نامه‌ای برای محاسبه پاسخ ماکزیمم سازه می‌باشد به‌صورت زیر به ضریب تغییرات مرتبط می‌باشد:

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (26)$$

که در آن C_g ضریب تندباد، $\left(\frac{\sigma}{\mu} \right)$ ضریب تغییرات و g_p ضریب اوج می‌باشد که برحسب خصوصیات سازه بین ۳/۵ تا ۴ متغیر است. شکل ۲ ضریب تغییرات جابجایی طولی بالای دودکش ۴۰۰ متری را به‌ازای سرعت‌های مختلف مبنای باد در سه ناحیه A, B و C نشان می‌دهد. با افزایش زبری و موانع سطح زمین، میزان آشفتگی جریان باد بیشتر شده و باعث افزایش ضریب تغییرات پاسخ و ضریب تندباد می‌گردد. برای یک ناحیه مشخص، با زیاد شدن سرعت مبنای باد، ضریب تغییرات افزایش می‌یابد که دلیل این موضوع را در شکل ۳ می‌توان مشاهده نمود. این شکل، طیف نیروی طولی بی‌بعد شده باد را در بالای دودکش برای سرعت‌های مبنای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. طیف‌ها به‌نحوی بی‌بعد شده‌اند که مقدار ماکزیمم آنها برابر یک شود. با افزایش سرعت مبنای باد، نقطه اوج طیف به سمت راست متمایل شده و در فرکانس بزرگتری قرار می‌گیرد که به فرکانس‌های اصلی دودکش‌ها (ارائه شده در جدول ۳) نزدیکتر می‌باشد و این موضوع موجب افزایش پاسخ دینامیکی طولی و ضریب تغییرات پاسخ آن می‌شود.



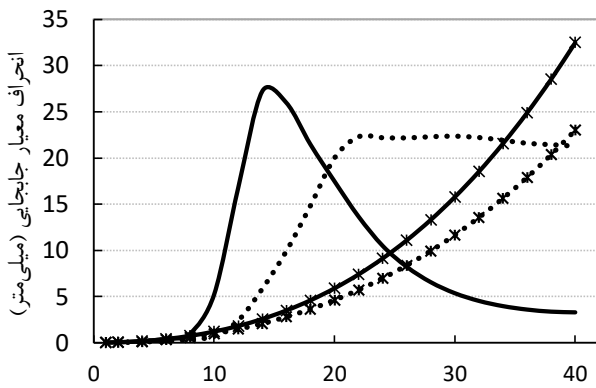
شکل ۲: ضریب تغییرات پاسخ جابجایی در بالای دودکش ۴۰۰ متری به‌ازای سرعت مبنای باد.



شکل ۳: منحنی‌های طیف نیروی طولی باد به‌صورت بی بعد شده به‌ازای سرعت‌های مبنای مختلف در بالای دودکش ۴۰۰ متری.

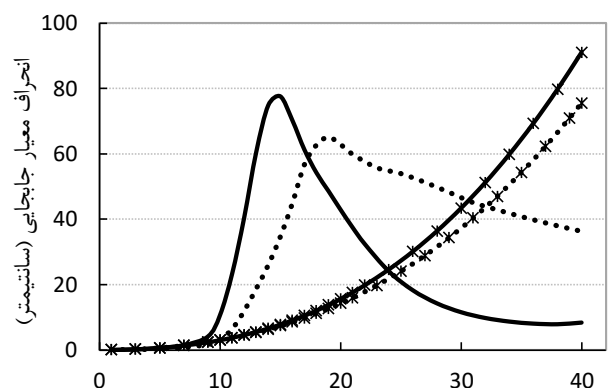
۵-۳- انحراف معیار پاسخ جابجایی دینامیکی عرضی و طولی

شکل ۴ انحراف معیار پاسخ‌های جابجایی طولی و عرضی بالای دودکش‌های با ارتفاع ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ را در دو ناحیه A و C به‌ازای سرعت مبنای باد نشان می‌دهد. برای هر دودکش، انحراف معیار پاسخ طولی با افزایش سرعت مبنای باد افزایش می‌یابد. اگرچه ضریب تغییرات پاسخ با افزایش زبری منطقه بیشتر می‌شود ولی انحراف معیار پاسخ برای مناطق با زبری بالاتر، کمتر می‌باشد که این موضوع ناشی از پایین‌تر بودن سرعت میانگین باد در این مناطق است. انحراف معیار پاسخ جابجایی عرضی دودکش‌ها به‌ازای سرعت‌های مبنای خاصی به اوج می‌رسد و با افزایش یا کاهش سرعت مبنا نسبت به مقدار مذکور، کاهش می‌یابد. در سرعت مبنای متناظر با پاسخ عرضی ماکزیمم، فرکانس‌های غالب ریزش گردبادی با فرکانس اصلی سازه یکسان می‌باشند. شکل ۵ طیف‌های نیروی عرضی باد را در بالاترین گره دودکش ۴۰۰ متری به‌ازای سرعت‌های مبنای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ متر بر ثانیه در ناحیه A نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود فرکانس اصلی سازه به فرکانس نقطه اوج طیف عرضی متناظر با سرعت مبنای ۱۵ متر بر ثانیه نزدیکتر است، در نتیجه پاسخ عرضی سازه در این سرعت مبنای نسبت به دو سرعت دیگر بیشتر می‌باشد. پاسخ طولی سازه به‌ازای این سرعت مبنای، به‌مراتب از پاسخ عرضی آن کمتر است. با افزایش سرعت مبنای باد پاسخ طولی سازه نسبت به پاسخ عرضی آن بیشتر می‌شود. منحنی پاسخ عرضی ناحیه C نسبت به ناحیه A، دارای پهنای بیشتری است که ناشی از آشفتگی بیشتر و محتوای فرکانسی پهن‌تر ریزش گردبادی در این ناحیه می‌باشد.



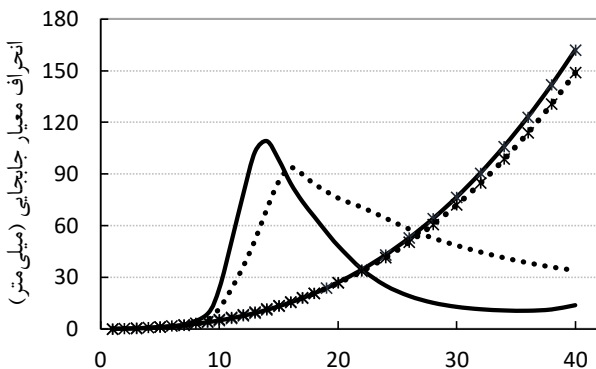
سرعت مبنای باد (متر بر ثانیه)

(a) $h=100$ m



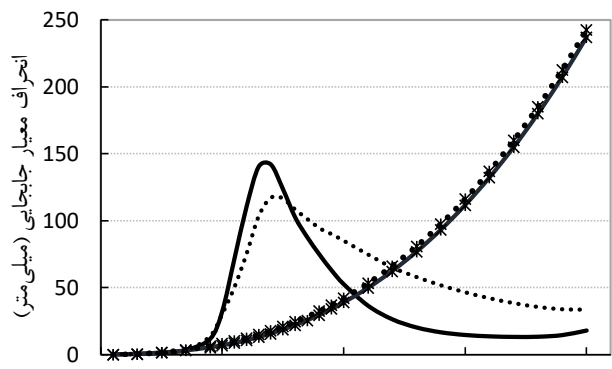
سرعت مبنای باد (متر بر ثانیه)

(b) $h=200$ m



سرعت مبنای باد (متر بر ثانیه)

(c) $h=300$ m

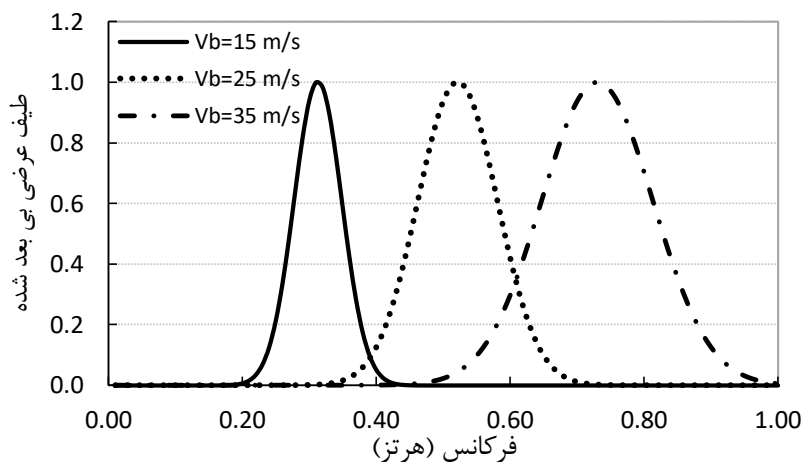


سرعت مبنای باد (متر بر ثانیه)

(d) $h=400$ m

— پاسخ عرضی ناحیه A - - * - - پاسخ طولی ناحیه A پاسخ عرضی ناحیه C * * * * * پاسخ طولی ناحیه C

شکل ۴: تغییرات انحراف معیار پاسخ جابجایی طولی و عرضی بالای دودکش‌ها با ارتفاع مختلف با سرعت مبنای باد.

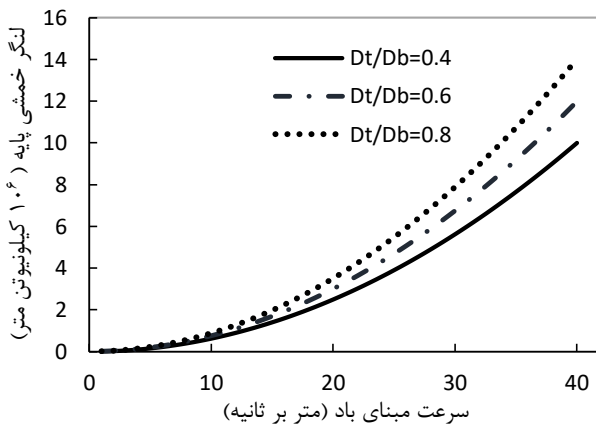


شکل ۵: منحنی طیف نیروی عرضی باد در بالاترین گره دودکش ۴۰۰ متری به ازای سرعت مبنای مختلف در ناحیه A.

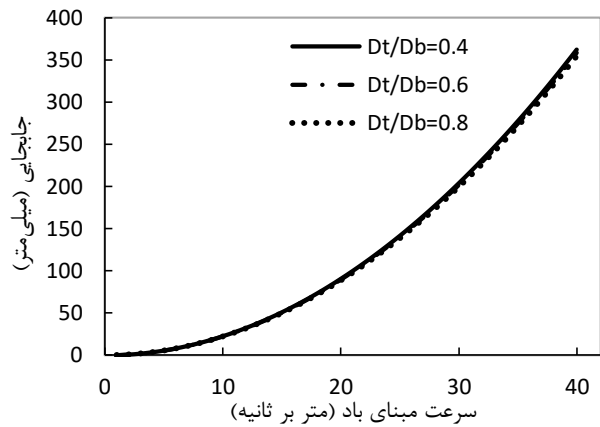
۵-۵- تاثیر نسبت قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش

به منظور ارزیابی تاثیر نسبت قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش و یا شیب مخروطی آن در پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی باد، دودکش بتن‌آرمه با ارتفاع ۳۰۰ متر و نسبت‌های قطر ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ در ناحیه A با سرعت‌های مبنای مختلف مدل‌سازی و تحلیل گردید.

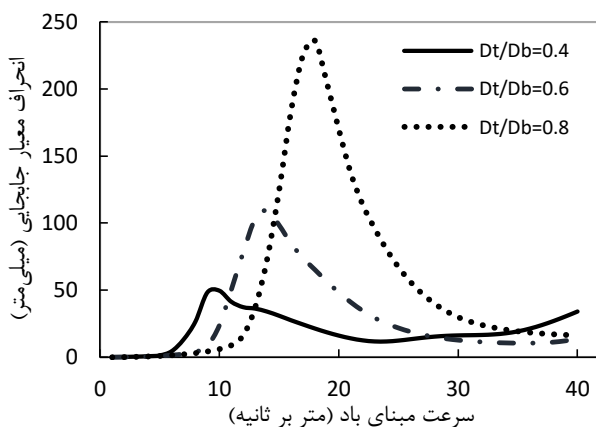
شکل ۶ نتایج حاصله را برای پاسخ‌های جابجایی استاتیکی، لنگر خمشی پایه، و انحراف معیار جابجایی طولی و عرضی بالای سازه نشان می‌دهد. پاسخ‌های جابجایی استاتیکی برای نسبت‌های مختلف قطر دودکش، خیلی نزدیک به هم بوده و تفاوت محسوسی نشان نمی‌دهد. موضوع برای انحراف معیار جابجایی طولی سازه در شکل ۶-ج نیز به همین صورت می‌باشد. اگرچه کاهش قطر فوقانی دودکش با کاهش سختی جانبی سازه همراه می‌باشد ولی از طرف دیگر موجب کاهش مساحت موثر در برابر جریان باد و کاهش نیروی ناشی از آن می‌گردد، در نتیجه دو عامل فوق به صورت متقابل عمل نموده و در پاسخ‌های جابجایی استاتیکی و انحراف معیار جابجایی طولی اثر همدیگر را خنثی می‌نمایند. با کاهش قطر فوقانی دودکش، سختی جانبی و جرم سازه به صورت توأم کاهش یافته و در نتیجه فرکانس‌های اصلی سازه به‌زای نسبت قطرهای مختلف، به هم نزدیک می‌باشند. مطابق شکل ۶-ب با کاهش قطر فوقانی دودکش و کمتر شدن سطح موثر در برابر باد، لنگر خمشی پای دودکش کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۶-د پاسخ عرضی سازه وابستگی زیادتری به تغییرات قطر دودکش دارد به نحوی که پاسخ عرضی ماکزیمم برای نسبت قطر ۰/۴ در مقایسه با نسبت قطر ۰/۸، ۸۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. با کاهش قطر فوقانی دودکش، شیب مخروطی دیواره آن افزایش یافته و گردبادهای ریزش‌شده در ناحیه پشت دودکش از ابعاد متنوع‌تر و محدوده فرکانسی پهن‌تری تشکیل می‌شوند که این موضوع در شکل ۷ قابل ملاحظه می‌باشد. در این شکل طیف نیروی عرضی باد برای سه نسبت قطر مطالعه‌شده، ارائه گردیده است. با کاهش نسبت قطر، مقدار بیشینه تابع طیف کاهش یافته و محتوای فرکانسی طیف پهن‌تر می‌شود که موجب دورتر شدن سازه از حالت تشدید و کاهش پاسخ دینامیکی آن می‌گردد.



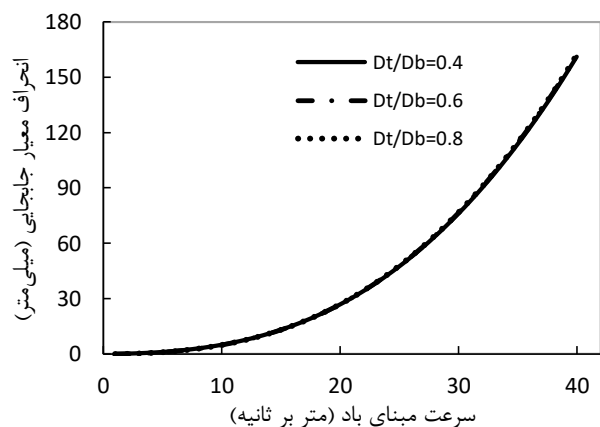
ب- لنگر خمشی استاتیکی پایه



الف- پاسخ استاتیکی

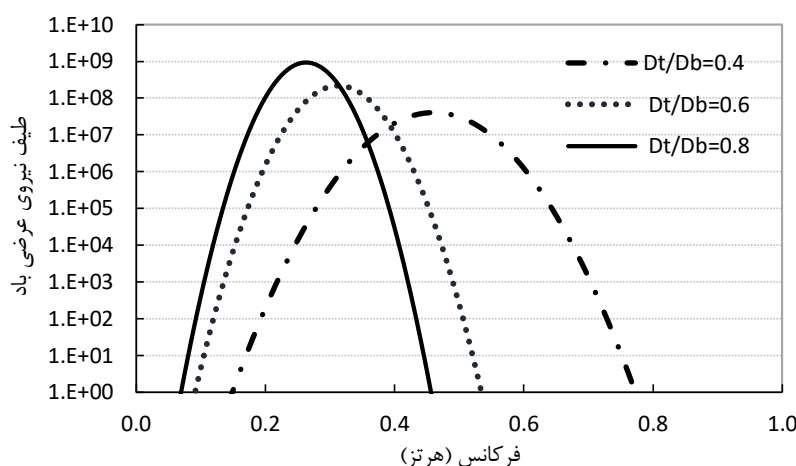


د- انحراف معیار جابجایی عرضی



ج- انحراف معیار جابجایی طولی

شکل ۶: پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی دودکش با ارتفاع ۳۰۰ متر در ناحیه A برای نسبت‌های مختلف قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش.



شکل ۷: طیف‌های نیروی عرضی باد برای دودکش با ارتفاع ۳۰۰ متر در ناحیه A به‌ازای نسبت‌های مختلف قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پاسخ طولی و عرضی دودکش‌های بلند بتن‌آرمه در محدوده ارتفاعی ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر در مقابل بارهای دینامیکی باد مورد ارزیابی قرار گرفت. دودکش‌ها در نواحی با زبری متفاوت و سرعت مبنای باد مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. پاسخ سازه‌ها با تحلیل حوزه فرکانس و براساس روش تئوری ارتعاشات تصادفی محاسبه گردید و ضمن تشریح مبانی کامل محاسباتی در مقاله حاضر، کلیه مراحل مدلسازی سازه و تعیین خصوصیات دینامیکی باد، شامل المان بندی سازه، محاسبه ماتریس‌های سختی، جرم، میرایی، و پاسخ فرکانسی سازه، تعیین ماتریس طیف نیروهای دینامیکی طولی و عرضی باد، و انتگرال‌گیری عددی جهت محاسبه انحراف معیار پاسخ سازه با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفت. تاثیر عوامل مختلف از قبیل ارتفاع دودکش، سرعت مبنای باد، ناحیه قرارگیری سازه، و شیب مخروطی و یا نسبت قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش در پاسخ سازه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. براساس تحلیل همگرایی، پاسخ دینامیکی سازه به‌ازای انتخاب ۳۰ المان به همگرایی قابل قبولی رسید. براساس تحلیل انجام گرفته نتایج ذیل در خصوص رفتار دودکش‌های بتن‌آرمه بلند حاصل گردید:

- با افزایش سرعت مبنای باد، فرکانس نقطه اوج طیف نیروی طولی باد به فرکانس اصلی دودکش‌های مورد مطالعه نزدیک شده و موجب افزایش ضریب تغییرات پاسخ طولی سازه می‌گردد. ضریب تغییرات پاسخ طولی سازه با سرعت مبنای باد به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. به طور موردی برای دودکش ۴۰۰ متری واقع در نواحی A، B، و C، ضریب تغییرات با افزایش سرعت مبنای باد از ۲۰ به ۴۰ متر بر ثانیه، به طور میانگین ۴۸/۵ درصد افزایش نشان می‌دهد.
- با افزایش زبری و موانع سطح زمین و بیشتر شدن آشفتگی جریان باد، ضریب تغییرات پاسخ طولی باد افزایش می‌یابد. به طور مثال برای دودکش ۴۰۰ متری به‌ازای سرعت مبنای ۳۰ متر بر ثانیه، مقدار ضریب تغییرات برای نواحی B و C به ترتیب ۷/۷ و ۲۳/۵ درصد بیشتر از مقدار آن در ناحیه A می‌باشد.
- منحنی تغییرات انحراف معیار جابجایی طولی بالای دودکش با سرعت مبنای باد به صورت سهمی می‌باشد که شیب آن با افزایش سرعت مبنای باد افزایش می‌یابد برای دودکش‌های با محدوده ارتفاعی مطالعه شده در ناحیه A، مقدار انحراف معیار جابجایی طولی با افزایش سرعت مبنای باد از ۲۰ به ۴۰ متر بر ثانیه، به طور میانگین ۵/۸۶ برابر می‌شود.
- نقطه اوج پاسخ‌های جابجایی عرضی برای دودکش‌های مورد مطالعه در محدوده سرعت مبنای ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه قرار دارد. در سرعت مبنای متناظر با پاسخ عرضی ماکزیمم، مقدار میانگین نسبت پاسخ عرضی به پاسخ طولی برای دودکش‌های واقع در ناحیه A برابر ۱۰/۲۵ می‌باشد. با افزایش سرعت مبنای باد پاسخ عرضی کاهش و پاسخ طولی افزایش می‌یابد به نحوی که برای دودکش‌های مذکور مقدار میانگین نسبت پاسخ طولی به پاسخ عرضی به‌ازای سرعت مبنای ۳۰ متر بر ثانیه برابر ۵/۱ می‌باشد.

به‌ازای مقدار ثابت قطر تحتانی دودکش، کاهش نسبت قطر فوقانی به قطر تحتانی آن بدون اینکه تغییر محسوسی در پاسخ جابجایی استاتیکی و دینامیکی طولی داشته باشد موجب کاهش وزن دودکش و لنگر خمشی پایه می‌گردد. به‌ازای سرعت مبنای باد ۴۰ متر بر ثانیه برای نسبت‌های قطر فوقانی به قطر تحتانی دودکش ۰/۴ و ۰/۶ در مقایسه با نسبت قطر ۰/۸، مقدار لنگر خمشی پایه دودکش به‌ترتیب ۲۸/۷ و ۱۴/۲۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش قطر فوقانی دودکش، گردبادهای ریزش شده در ناحیه پشت دودکش از ابعاد متنوع‌تری تشکیل می‌شوند و محدوده فرکانسی نیروی عرضی باد پهن‌تر می‌شود و در نتیجه پاسخ عرضی سازه به‌نحو موثری کاهش می‌یابد. به‌طور نمونه برای دودکش ۳۰۰ متری در ناحیه A مقدار انحراف معیار جابجایی عرضی بیشینه به‌ازای نسبت قطرهای ۰/۴ و ۰/۶ در مقایسه با مقدار مربوط به نسبت قطر ۰/۸، به‌ترتیب ۵۳/۷ و ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Davenport A.G. (1967), "Gust loading factors"; *Journal of the Structural Division, ASCE*, **93**, 11-34
- [2] Vickery B.J. (1970) ; "On the reliability of gust loading factors"; Proc., *Technical Meeting Concerning Wind Loads on Buildings and Structure*, 30 , 296-312.
- [3] Solari, G. (1993a), "Gust buffeting. I: Peak wind velocity and equivalent pressure"; *Journal of Structural Engineering*, 119(2) , 365-382.
- [4] Solari G. (1993b), "Gust buffeting. II: Dynamic along-wind response"; *Journal of Structural Engineering*, 119(2), 383-397.
- [5] Menon D. and Rao S. (1997), "Estimation of along-wind moments in RC chimneys", *Engineering Structures*, 19(1), 71-78.
- [6] Kijewski T., and Kareem A. (1998), "Dynamic wind effects: A comparative study of provisions in codes and standards with wind tunnel data"; *Wind and Structures An International Journal*, 1(1) 77-109.
- [7] Zhou Y., Kijewski T., and Kareem A. (2002), "Along-wind load effects on tall buildings: Comparative study of major international codes and standards"; *Journal of Structural Engineering, ASCE* , 128, 788-96.
- [8] Kwon D.K. and Kareem A. (2013), "Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings"; *Engineering Structures*, 51 23-35
- [9] Vickery B.J. and Clarke A.W. (1972), "Lift or across-wind response of tapered stacks"; *Journal of the Structural Division*, 98, 1-20.
- [10] Vickery B.J. and Basu R.J. (1983), "Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. part I. development of a mathematical model for two-dimensional conditions"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 49-73
- [11] Vickery B.J. and Basu R.I. (1984), "The response of reinforced concrete structures to vortex shedding"; *Journal of Structural Engineering*, 6, 324-333.
- [12] Menon D. and Rao S. (1997), "Uncertainties in codal recommendations for across-wind load analysis of R/C chimneys"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, 455-468
- [13] Arunachalam, S. (2014) , "A method for prediction of across-wind response of tall circular concrete chimneys."; *J. Wind and Engineering*, 11(1) 23-39.
- [14] Arunachalam S., Lakshmanan N. (2015), "Across-wind response of tall circular chimneys to vortex shedding"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145 187-19
- [15] Wang Ch., Lü Z., Tu Y. (2011) , " Dynamic Responses of Core-Tubes with Semi-Flexible Suspension Systems Linked by Viscoelastic Dampers under Earthquake Excitation"; *Advances in Structural Engineering*, 14(5), 801-813.
- [16] Zhang X., Qin X., Cherry S., Lian L., Zhang J., Jiang J. (2009), " A New Proposed Passive Mega-Sub Controlled Structure and Response Control"; *Journal of Earthquake Engineering*, 13, 252-274.
- [17] Zhang X., Zhang J. L., Wang D., Jiang J. S. (2005) , "Controlling characteristics of passive mega-sub controlled frame subjected to random wind loads"; *Journal of engineering mechanics*, 131(10), 1046-1055.
- [18] Wu J. C. and Yang J. N. (1998), "Active control of transmission tower under stochastic wind"; *Journal of Structural Engineering*, 124(2), 1302-1312.
- [19] Paz M. (1991), "Structural Dynamics", Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- [20] Preumont A. (1994), "Random vibration and spectral analysis", Kluwer academic publishers, Dordrecht.
- [21] National Research Council (NRC) (2010). National building code of Canada, Ottawa (Canada): Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.
- [22] Simiu E., & Scanlan R. H. (1996), "Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design"; New York: Wiley.