برآورد مولفه های نیروهای آئروالاستیک بر سازه های بلند

- چکیده

با کاهش وزن سازه ها ناشی از پیشرفت در ساخت مصالح سبک به تدریج اثرات جریان سیال باد عامل تعیین کننده رفتار سازه ای مطرح گردیده اما متاسفانه تعداد محدودی فرمول بندی تحلیل بمنظور محاسبه مولفه های نیروهای ناشی از باد وجود دارد. در نهایت آئین نامه های حاضر فقط به بررسی اثرات استاتیکی باد پرداخته اند که با توجه به نیازهای موجود کافی بنظر نمی رسد. از این نیروها جهت آنالیز استاتیکی احساس می شود.

هنگامی که پاسخ سازه ای باد القائی شامل مجموع اثرات استاتیکی و دینامیکی را بعنوان باد القائی کامل در نظر بگیریم قادر خواهیم بود اثر باد را بر حسب زمان بعنوان یک عملکرد استاتیکی بر سازه فرض نمود و بدین سان ترکیبات عملکرد باد شامل میانگین اثرات دینامیک رزونانس و دینامیک غیررزونانس را پیش بینی نمود. البته در این فرآیند باید به تفاوت توزیع فضائی نیروها بر سازه دقت نمود. به عبارتی با بررسی مدل آئروالاستیک مشاهده می شود اهمیت نیروهای برا و القائی در امتداد ارتفاع قابل ملاحظه است بطوریکه پاسخ دینامیکی بر اساس نیروهای برا و کشش القائی تعیین می شود نه نیروهای موجود در امتداد محورهای x و y بعبارتی در واقع اجزاءدینامیک غیررزونانسی و میانگین تغییرات نیروی باد خارجی را دنبال می کنند در حالی که بخش دینامیک رزونانس توزیع نیروهای داخلی که در هر ناحیه سازه متناظر با جرم و شتاب محلی سازه است را پیگیری می کنند . در این روش حتماً می بایست بارهای استاتیکی مستقل مورد اصلاح و بهینه سازی قرار گیرند .در سازه های بلند این مسئله منتج به توزیعات جداگانه از بارهای جانبی x و y عمل کننده در حالت استاتیکی نیروی پیچشی در نقاط مختلف در ارتفاع سازه می شود و به عبارتی برای اعضاء سازه ای با عملکردهای ویژه که متاثر از ترکیبات نیروهای باد در جهات مختلف می باشد ورود ضرایب ترکیب بار مختلف با توجه به عدم احتمال وقوع همزمان کل مقادیر باد جزیی غیرضروری بنظر می رسد.

- مقدمه

در برخورد با اثرات باد بر روی ساختمان ها و سازه های بلند مهندسی عمران همواره این پرسش مطرح بوده که آیا قادر خواهیم بود با استفاده از روشهای آئین نامه ای و تحلیل به بررسی اثرات و در نهایت پاسخ سازه برسیم . این مسئله با تمایل مهندسان معماری به اشکال جدید و پلانهای پیچیده ابعاد تازه ای یافته است . در هر صورت با عنایت به آنکه اطلاعات ایردینامیکی بیشتر در ارتباط با ساختمانهائی با اشکال قوطی شکل و عمدتاً منفرد بوده چنین اطلاعاتی نمی تواند برای ساختمانهای ناهمگون و گاه هم جوار ساختمانهای بلند دیگر مصداق داشته باشد. از این رو استفاده از اطلاعات تونل باد تکیه گاه اصلی در مطالعه مهندسی باد محسوس می شود.۷

در برخورد با اثرات باد می توان به چندگونه با سازه برخورد نمود. در حالت اول برخورد استاتیکی با سازه است به این مفهوم که میانگین معدل زمان از نیروهای باد پیرامون را در نظر گرفت و در حالت دوم با توجه به جزء

دینامیکی و اثر نوسانات آن که خود ایجاد پدیده تشدید می نماید ساختمان را مورد بررسی قرار داد . همچنین می توان عملکرد باد را همچون یک روند رندوم ساکن محلی در نظر گرفت و با استفاده از تحلیل شرطی و تئوری نوسانات اتفاقی به تخمین نیروهای باد دست زد.

-بررسی و برآورد مولفه نیرو در امتدادهای عمود بر سازه

به منظور ارائه سازه بعنوان یک سیستم ایرودینامیکی با خواص جرم، سختی و میراثی منوط به یک زمان و زمینه متغیر فضائی نیروی باد خارجی در معادله مود بصورت زیر خواهد بود:

$$M_j\ddot{\eta}+2\omega_J M_j\xi_j\dot{\eta}_J+\omega_J{}^2M_j\xi_j\eta_J=F_j \qquad .۱$$

که در آن η_j مختصات کلی حرکت می باشد، همچنین $\dot{\eta}_j$ و $\ddot{\eta}_j$ مشتقات اول ودوم آن در واحد زمان است و ξ_j و ω_j و M_j و F_j به ترتیب نسبت میراثی ، فرکانس طبیعی ، جرم کلی و نیروی کلی در حالت مود j می باشد. در حالت عمومی نیروی وارده در مود j در جریان آشفته خاص در زمان t به عملکرد جمعی نیروهای جریان بر روی سطوح خارجی ساختمان و مشقات زمانی آن بستگی دارد و فرم عمومی آن بصورت $F_j=F_j\left(t,\eta_j,\dot{\eta}_j,\ddot{\eta}_j\right)$ خواهد بود. البته استفاده از این روابط بدون ساده کردن فرضیات مشکل است از اینرو با فرض اینکه حرکت ساختمان نیروی باد ایرودینامیکی خارجی وارد بر بدنه را تغییر نمی دهد می توان با این نیرو همچون نیروهای استاتیکی یا ساکن برخورد نمود. این تخمین برای اغلب کاربردهای مهندسی باد تخمین های خوبی را در بردارد اما در حالتی همچون ریزش های گردبادی بی ثباتی های ایرودینامیکی ایجاد می شود که نیاز به مطالعات ویژه ای دارد . در حالت شبه استاتیکی می توان عمل نیروهای ایرودینامیکی را به گونه ای فرض نمود که اثرات حرکت بدنه در یک جریان حرکتی توسط باز خوردهای آیرودینامیکی اضافی که اثرات η و $\dot{\eta}$ و $\ddot{\eta}$ را مهار می کنند تخمین زده شوند .

از سوی دیگر با عنایت به عدد اسکروتن در حرکت بدنه می توان دریافت که بازخوردهای ائروالاستیک حرکت بدنه به پارامتر میرائی جرمی سازه وابسته است. درتعریف عدد اسکروتن m_s جرم ساختمان در واحد طول سازه و ρ چگالی هوا و D قطر یا عرض سازه را شامل و بصورت زیر محاسبه می شود:

$$S_c=\frac{4\pi\ \xi_s\ \ m_s}{\rho\ \ D^2} \qquad .۲$$

نیروهای مربوط به تندی بدنه $\dot{\eta}$ از میان سایر شرایط بازخوردهای ائروالاستیک از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و این پارامتر خود با مطرح کردن میرائی ائرودینامیکی قابل قبول می باشد تاثیر سایر باز خوردهای آئروالاستیک اثرات به η و $\ddot{\eta}$ مربوط می شود که بعنوان لختی و جرم آئرودینامیکی مطرح می گردد کوچک بوده و قابل صرف نظر کردن می باشد. حال اگر میرائی ائرودینامیکی را با ξ_j در حالت مود j به منظور مهار تاثیرات بازخوردهای ائروالاستیکی در نظر بگیریم معادله حرکت بصورت زیر در خواهد آمد :

$$M_j\ddot{\eta}+2\omega_J M_j(\xi_{si}+\xi_{aj})\dot{\eta}_J+\omega_J{}^2M_j\xi_j\eta_J=F^*{}_j \qquad .۳$$

در رابطه بالا F_j^* نیروی بار عمومی برای مود j است که جهت بررسی نیروهای شبه ایرودینامیکی ارزیابی شده است . این نیرو وابسته به درجات آزادی در سازه های عمودی همچون برجهای مخابراتی و دودکشها بوده و در تفسیر آن می بایست به تغییرات نوسانی در جهت های x و y همچنین پیچش در امتداد θ توجه نمود . حال اگر سازه را به عنوان یک سیستم پارامتر توده ای با جرمهای توده ای m_i در موقعیتهای متفاوت $i=1\ ,N$ فرض و مدل

جابجایی آن را در مورد مود j به صورت $\phi(x,y,\theta)_{ij}$ در نظر گرفت، آنگاه نیروهای x و y و پیچش θ در مختصات i و در واحد زمانt بصورت $F_{xi(t)}$ و $F_{yi(t)}$ و $F_{\theta i(t)}$ نمایش داده و نیروی عمومی F^*_j را بصورت زیر خواهیم داشت.

$$F_j^* = \sum \left[F_{xj}(t)\phi_{xji} + F_{yj}(t)\phi_{yji} + F_{xj}(t)\phi_{zji}\right] \qquad .۴$$

حال می توانیم از این نیرو بعنوان مهار کننده عمل نیروی یا بار طولی و نیروی یا بار عرضی بر روی سازه های بلند خطی بصورت تحلیلی استفاده نمائیم . قابل ذکر است این عمل فقط با ورود داده های اطلاعاتی ایرودینامیکی کلیدی همچون میانگین و ضریب نیروی متغیر زمان عدد استروهال و همبستگی طولی و عرضی طیف ریزش گردابی که همه بصورت مشخصات ایرودینامیکی در جریانهای متلاطم و با مشخصه میانگین گیری دخیل هستند مهیا خواهد بود. همچنین بررسی اثرات نیروی عمودی بر سازه ها در مقاطع با ابعاد کوچک همچون نیروهای نوک ساختمانها با استفاده از تونل باد بسیار قابل توجه است چرا که اگر نسبت ارتفاع به بعد کوچک سازه از ۱۰ برابر بزرگتر باشد $(H/D_{\min} \le 10)$ در واقع جریانهای پیرامونی دارای اثرات ۳ بعدی خواهند بود و نه اثر نیروهای ۲ بعدی. اثرات نیروهای ۳ بعدی با توجه به تغییرات عمودی میانگین نیروها و جریان های متلاطم داخلی لایه اتمسفری در پیرامون ساختمانها و بناهای بلند قابل تاکید می باشد. حال پر واضح خواهد بود که بررسی نیرویی بالا در حالتی که در بعد زمان و فضا در حال تغییر است مبارزه ای بزرگ به حساب می آید در هر صورت تعریفی F_t برای اکثر بناهای بلند اجتناب ناپذیر بوده و بر استفاده از آزمایشهای تونل باد تاکید میشود.

- بررسی پارامترهای عامل

میرایی آئرودینامیکی در معادلات قبل را می توان بر اساس رابطه $\zeta_a = (\rho_{air}/\rho_s).Ca[V_H/(f_0 D)]$ بدست آورد که در آن اگر ρ_s را چگالی بدنه سازه در نظر بگیریم $C\alpha$ ضریب میرائی ائرودینامیکی می باشد که وابسته به شکل جابجائی ایرودینامیک مدل و میزان آشفتگی جریان دارد و در واقع باعث کاهش سرعت می شود . در پاسخ در جهت نیروی کششی، $C\alpha$ همواره مثبت بوده و در نتیجه ξ_a مفید و موثر می باشد اما رفتار $C\alpha$ در جهت نیروی برا مشخص نبوده و بستگی به شرایطی ایرودینامیکی خاص دارد. بعنوان نمونه در سرعتهای کاهنده $V_H/(f_o D) < 10$ که محدوده طرح را برای بیشتر ساختمانهای بلند ارائه می دهد. مقدار $C\alpha$ مقداری مثبت است اما $C\alpha$ منفی به معنای میرائی ائرودینامیکی منفی بوده و باز خورد اثرات ایروالاستیک به جای آنکه حرکت را کاهش دهند افزایش می دهد .در هر حال استفاده از آزمایش تونل باد بعنوان یک تخمین قابل اطمینان ،اجتناب ناپذیر است چرا که گاه هم نیروهای ایرودینامیک خارجی و هم نیروهای ناشی از بازخوردهای ایرولاستیک تحت تاثیر حضور ساختمانهای و دیگر و ویژگیهای توپوگرافی ویژه پیرامون خود قرار خواهند گرفت .

جهت بررسی و محاسبه نیروهای موجود با استفاده از نتایج ثبت شده توسط تاریخچه زمانی از فشارهای همزمان در سطوح مختلف استفاده می شوند . با بررسی ۹ مود اول در برج مخابراتی جاکارتا وCN مشاهده می شود حرکت جانبی اصلی در دو مود اول در امتداد و و نیز پیچشی مودهای اصلی و حاکم بر حرکات جانبی سازه میباشند . بنابراین می توان نیروها را در امتداد x وy و پیچش با انتگرال گیری از فعالیت نیروهای فشاری در هر منطقه بدست آورد . برای یک باد با زاویه αسهم کلی نیروهای x وy و نیز پیچش از روابط زیر حاصل می شود .

$$F_{xi}(\alpha\ ,t) = P_i(\alpha\ ,t) b_i h_i C_{xi} \qquad .۵$$

$$F_{yi}(\alpha\ ,t) = P_i(\alpha\ ,t) b_i h_i C_{yi} \qquad .۶$$

$$F_{\theta i}(\alpha\ ,t) = F_{xi}(\alpha\ ,t) arm_{xi} + F_{yi}(\alpha\ ,t) arm_{yi} \qquad .۷$$

که در این رابطه F_{xi}و F_{yi} نیروها در امتداد x وy و $F_{\theta i}$ مربوط به چرخش ناشی از فشار $P_i(\alpha\ ,t)$ با زاویه α

در زمان t همچنین b وh نیز ابعاد سطحی است که برای مود i در نظر گرفته شده است از سوی دیگر arm_X و arm_Y بازوهای نیرو در امتداد xها و yها می باشند . حال ممانهای اصلی و پیچشی بصورت زیر قابل محاسبه میباشند.

$$BM_X(\alpha\ ,t) = \sum F_X(\alpha\ ,t) z_i \qquad .۸$$

$$BM_Y(\alpha\ ,t) = \sum F_Y(\alpha\ ,t) z_i \qquad .۹$$

$$T(\alpha\ ,t) = \sum F_{\theta i}(\alpha\ ,t) \qquad .۱۰$$

که در واقع z ارتفاع از سطح زمینی هموار می باشد. حال همان خمشی لحظه ای قابل تعیین در همه امتدادها با فرمول بندی بالا می باشد . بسط کلی نیروها در مود j بصورت زیر می باشد:

$$F_j^*(\alpha\ ,t) = \sum \left[F_{xi}(\alpha\ ,t)\phi_{xji} + F_{yi}(\alpha\ ,t)\phi_{yji} + F_{\theta i}(\alpha\ ,t)\phi_{\theta ij} \right] \qquad .۱۱$$

که ϕ_{xji} مربوط به مود j از المان i در جهت x می باشد ، این تعریف برای حالات ϕ_{yji} و $\phi_{\theta ji}$ نیز تعمیم داشته و مربوط به جهت y و پیچش می باشد.

برای سازه های با میرائی کم با اختلاف جزء رزونانس دار تعمیم داده شده می توان بصورت زیر تعریف شود.

$$\sigma^2_{\eta R\ j} = \frac{1}{K_j^2}\frac{\pi}{4\zeta_i} f_{oj} S_{F_J^*}(f_{oj}) \qquad .۱۲$$

بطوریکه $K_j = M_j(2\pi\ f_{0j})^2$ سختی تعمیم داده شده مود j مربوط به F_J^* برای فرکانس f_{oj} باشد حال مقدار RMS ممان پایه جزء x ناشی از ارتعاشات رزونانس دار میتواند بصورت زیرتعریف شود.

$$\sigma_{BM(xRj)} = \sum m_i\ \sigma_{\eta(Rj)}\ \phi_{xji}(2\pi f_{oj})^2 z_i \qquad .۱۳$$

بطوریکه z ارتفاع محل از زمین، m_i جرم سازه تعیین شده برای آن محل و $\sigma_{\eta(Rj)}$ حاصل از رابطه۱۲ میباشد.در نتیجه قادر خواهیم بود تخمین مناسبی از پاسخ سازه ناشی از نوسانات رزونانس دار ارتعاش در مودهای مختلف بدست آوریم . با استفاده از این روش مقدار ممان خمشی اصلی پایه ناشی از نیروی باد ، در امتداد برای یک سرعت و جهت مشخص بصورت زیر خواهد بود.

$$\hat{BM}_x = \overline{BM}_x + g\left[\sigma^2{}_{BM(xB)} + \sum_{j=1,9} \sigma^2_{BM(xRj)} \right]^{1/2} \qquad .۱۴$$

که $\overline{BM}_x$ مقدار متوسط، $\sigma_{BM(xB)}$ مربوط به RMS در جزء غیررزونانسی و $\sigma_{BM(xRj)}$ مربوط به ممان خمشی اولیه پایه ناشی از نیروی اینرسی ارتعاشات رزونانس دار رابطه (۱۳)می باشد .

اثرات میرائی برای مود j با استفاده از رابطه $\zeta_j = \zeta_{sj} + \zeta_{aj}$ که در آن ζ_{sj} مربوط به میرائی اجزاء سازه ای و ζ_{aj} مربوط به میرائی ایرودینامیکی می باشد در نظر گرفته می شود . برای آنالیز اطلاعات فشار می توان $\zeta_{aj} = 0$ و $\zeta_{sj} = 0.02$ فرض نمود، چرا که نسبت میرائی 0.02 مقداری نرمال برای سازه های بتنی می باشد

هنگامی که پاسخ سازه ای بار القائی شامل مجموع اثرات استاتیکی و دینامیکی را بعنوان بار القایی کامل در نظر بگیریم در واقع می توان اثر باد را برحسب زمان بعنوان یک عملکرد استاتیکی فرض و بر سازه وارد نمود در این حالت قادر خواهیم بود ترکیبات عملکرد بار شامل میانگین ، دینامیک رزونانسی و غیررزونانس را در سازه پیش بینی کنیم. و آن را در معادله $\hat{BM}_x$ منعکس نمائیم. البته در این فرایند باید به تفاوتهای توزیع فضایی این نیروها بر سازه دقت کنیم. اجزاء دینامیک غیررزونانسی و میانگین تغییرات نیروی باد خارجی را دنبال میکنند. در حالی که بخش های دینامیک رزونانسی دار توزیع نیروهای داخلی که در هر ناحیه سازه متناظر با جرم و شتاب محلی است را دنبال می کنند . در این روش حتماً می بایست، بارهای استاتیکی مستقل مورد اصلاح و بهینه سازی قرار

گیرند .

برای یک ساختمان بلند این مسئله منتج به توصیفات جداگانه ای از بارهای جانبی x و y عمل کننده در حالت استاتیکی و نیروی پیچش موثر در نقاط مختلف در ارتفاع سازه می شود . بعبارتی برای اعضاء سازه ای با عملکرد های ویژه که متاثر از ترکیبات نیروهای باد در جهات مختلف می باشند ورود ضرائب ترکیب بار مختلف با توجه به عدم احتمال وقوع همزمان کل مقادیربارهای باد جزئی غیر ضروری بنظر می رسد .

حال اگر فرض کنیم نیروی باد القائی در آلمان از نیروهای عمل کننده استاتیکی باد در جهات xوy و پیچش متاثر باشد می توان نیروی حداکثر وارد i بر المان را بصورت زیر نگارش نمود :

$$F_{i(man)} = \left(\left| C_{yi} BM_y + C_{xi} BM_x + C_{Ti} T \right| \right)_{\max} \qquad .۱۵$$

که C_{yi}و C_{xi} و C_{Ti} ثابت هائی هستند که نیروهای باد را در جهت های مختلف در المان متمرکز می کنند BM_Xو BM_Y و T نیز ممانهای خمشی x وy اصلی و پیچش اصلی هستند که در واقع مولفه های باد را توجیه میکنند. حال از آنجایی که مؤلفه های باد هر یک مستقل می باشند مقادیر حداکثر آنها بصورت $B\hat{M}_X$ و $B\hat{M}_Y$ و $\hat{T}$نشان داده میشوند که البته بصورت همزمان اتفاق نمی افتند. پس میتوان مقدار $F_{i(\max)}$را بصورت پیشنهاد نمود :

$$F_{i(\max)} \le \left| C_{yi} B\hat{M}_y \right| + \left| C_{xi} B\hat{M}_x \right| + \left| C_{Ti} . \hat{T} \right| \qquad .۱۶$$

در این حالت استفاده از بارهای جزئی ماکزیمم که بصورت مستقل عمل می کنند زیاد ضروری بنظر نمیرسد. در نهایت به منظور رسیدن به حالت بهینه می توان از فاکتوری استفاده کرد که بصورت ترکیبی عمل نماید . این ضریب به گونه ای انتخاب می شود تا بتوان میان هر دو گفته شده در بالا مطابقت ایجاد کند . به این منظور رابطه زیر پیشنهاد می شود :

$$\phi = \frac{\left(\left| C_{yi} . BM_y + C_{xi} . BM_x + C_{Ti} . T \right| \right)_{\max}}{\left(\left| C_{yi} . B\hat{M}_y \right| + \left| Cx_i . B\hat{M}_x \right| + \left| C_{Ti} . \hat{T} \right| \right)} \qquad .۱۷$$

بعنوان نمونه در شکل (۱) فاکتورهای ترکیبی باد برای یک ساختمان ۱۳۰ متری برای ترکیبات ارائه گردیده شده است. محدوده این نسبتها به گونه ای انتخاب می شود که همه مؤلفه های مشابه و عملکردهای سازه ای درون ساختمان را پوشش دهد . در حالتی که $C_x / C_y = C_T / C_y = 1$ را نشان دهد یعنی بطور مساوی سازه از بارهای پیچشی وx وy بار القایی متاثر شده است . از طرفی ترکیب $C_T / C_y = 100$ و $C_x / C_y = 0.01$ المانی را نشان می دهد که در واقع متاثر از اثرات پیچشی است . در نهایت می توان برای کمترین مقادیر ϕ حالتی را که المان دارای حساسیت تفریباً مشابه در ارتباط با سه مولفه بار می باشد در نظر گرفت . از سوی دیگر ϕ هنگامی به ۱ نزدیک می شود که یکی از مولفه ها حاکم باشد . پس می توان از مقادیر ϕرفتار مورد انتظار را بازسازی نمود . از این رو آئین نامه کانادا (NBCC) فاکتور ترکیبی را برای پیشنهاد نموده تا در عمل ترکیبی از مولفه بارهای باد وارده بر سازه مدلسازی شود .

شکل ۱- ضرائب ترکیب بارها برای اعضاء سازه ای با

مراجع

1. A. Kareem 1999, "Analysis & modelling of wind effect : Numerical Technique" Proceeding of the 10 International confenence on Engineering Rotterdam.
2. N.Isyumov ,P.C.Case & T.C.E.Ho,1999,Wind tunnel model studies to predict the action of wind on projected 558m Jakarta Tower. Proceeding of the 10 International confenence on Engineering Rotterdam.
3. Gurley, K. & A. Kareem 1997b. Analysis interpretation modeling and simulatin of unsteady wind and prassure data. J. of wind engineering and industial Aerodynamics.67 – 71:657-669
4. A. larsen, G.L.Larose & F.M.Livesey, 1999, Wind Engineering into the 21St Century, Balkema.Vol.1-3.
5. National Building Code of Canada (1995), Canadian Commission and Building and Fire Codes, National Research Council, Canada.