



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



تحلیل نیروهای دینامیکی و استاتیکی وارد بر فونداسیون کمپرسور دوار

علیرضا شریعت^ا، حسن شکراللهی^{ب*}

^اایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشجوی کارشناسی ارشد

^بایران، تهران، خ طالقانی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hshokrollahi@khu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، تحلیل دقیق نیروهای دینامیکی و استاتیکی وارد بر فونداسیون یک نمونه کمپرسور دوار بررسی شده است. کمپرسور به همراه الکتروموتور به عنوان اجزای اصلی در نظر گرفته شده است که فونداسیون برای آنها طراحی شده است. با استفاده از استانداردهای مربوط به طراحی فونداسیون و محاسبات مرتبط با نیروهای ناشی از نامیزانی شفت و نیروهای ناشی از ارتعاشات، میزان نیروهای وارد بر فونداسیون محاسبه و تحلیل شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت فونداسیون و بهبود توزیع بار، عملکرد فونداسیون بهبود یافته و میزان ارتعاشات کاهش می‌یابد. تمامی محاسبات استاتیکی و دینامیکی برای فونداسیون با دو ارتفاع ۴۵ و ۶۰ سانتیمتر انجام شده است و نتایج قابل قبولی برای هر دو حالت دارد. طبق محاسبات با افزایش ضخامت از ۴۵ سانتیمتر به ۶۰ سانتیمتر، نسبت وزن فونداسیون به سازه از ۱،۳۵ به ۱،۷۹ افزایش می‌یابد که البته با توجه به مناسب بودن نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی در حالت ضخامت ۴۵ سانتیمتر، لزومی به افزایش بیشتر آن نیست.

کلمات کلیدی: فونداسیون؛ کمپرسورهای دوار؛ نیروهای دینامیکی؛ ارتعاشات.

۱- مقدمه

فونداسیون‌ها یکی از مهم‌ترین اجزای سازه‌ای برای پایداری ماشین‌آلات صنعتی مانند کمپرسورهای دوار هستند. نیروهای وارد بر این فونداسیون‌ها شامل نیروهای دینامیکی ناشی از ارتعاشات و نامیزانی شفت و نیروهای استاتیکی ناشی از وزن سازه و تجهیزات است. این مقاله به بررسی دقیق این نیروها و تأثیر آن‌ها بر عملکرد فونداسیون‌ها می‌پردازد. در این مطالعه، از روش‌های استاندارد محاسباتی و تحلیلی برای محاسبه نیروهای وارد بر فونداسیون کمپرسور استفاده شده است. نیروهای دینامیکی ناشی از نامیزانی شفت و ارتعاشات با استفاده از معادلات مربوط به نیروی مرکز گریز و نیروهای استاتیکی ناشی از وزن سازه محاسبه شدند. همچنین، تحلیل نیروهای ناشی از زلزله با استفاده از روش بار استاتیکی معادل صورت گرفته است. نتایج محاسبات نشان داد که افزایش ضخامت فونداسیون و توزیع مناسب نیروها می‌تواند به بهبود پایداری فونداسیون و کاهش ارتعاشات کمک کند. همچنین، نتایج حاکی از آن بود که نیروهای ناشی از راه‌اندازی موتور و زلزله نیازمند توجه جدی در طراحی فونداسیون هستند. برای مثال، افزایش ضخامت فونداسیون از ۴۵ به ۶۰ سانتیمتر باعث افزایش نسبت وزن فونداسیون به سازه و بهبود پایداری سازه شد.

روندی که برای طراحی و تحلیل فونداسیون متناسب با ماشین‌های گریز از مرکز ارائه شده است، در ادامه ارائه می‌شود. این تحلیل که مطابق با مرجع [۱] است، شامل مراحل زیر است:

- ۱- استخراج پارامترهای ماشین و تجهیزات آن، شناسایی انواع نیروها ناشی از بارهای استاتیکی و دینامیکی،
- ۲- تهیه پارامترهای خاک (بستری که قرار است فونداسیون روی آن قرار گیرد) مانند چگالی، مدول برشی و حد تحمل بار خاک،
- ۳- انتخاب هندسه اولیه برای فونداسیون، مهمترین معیارها به شرح ذیل است:
 الف) وزن فونداسیون باید ۲ تا ۳ برابر وزن ماشین و متعلقات آن باشد.
 ب) معمولا حداقل ارتفاع یک فوت (31 cm)~ برای در امان بودن از اثر آبهای سطحی لازم است.
 پ) معمولا ضخامت بلوک باید بیش از یک پنجم حداقل سایر ابعاد و یا یک دهم حداکثر سایر ابعاد آن باشد.
 ت) عرض فونداسیون باید به اندازه کافی باشد تا دمپینگ لازم در برابر مود تاب خوردن افزایش یابد. عرض فونداسیون باید حداقل یک تا یک و نیم برابر فاصله عمودی کف تا محور مرکزی ماشین باشد.
 ث) با تعیین شدن ضخامت و عرض، مطابق بند الف (حداقل وزن فونداسیون) طول آن نیز تعیین می‌شود. همچنین در صورت لزوم می‌توان فاصله‌ای از هر طرف حداقل به اندازه یک فوت برای تعمیرات و دسترسی مناسب در نظر گرفت.
 ج) طول و عرض فونداسیون در نهایت به گونه‌ای تغییر داده شود که مرکز جرم ماشین و تجهیزات آن منطبق با مرکز جرم فونداسیون باشد (در صورت عدم تطابق، میزان اختلاف نسبی در هر راستا باید کمتر از ۵٪ اندازه سازه در آن راستا باشد). در نهایت نیز مرکز جرم کلی (ماشین، تجهیزات و فونداسیون) باید منطبق با مرکز مقاومت خاک باشد.
 چ) پس از انجام آنالیز دینامیکی و تعیین فرکانس‌های رزونانس فونداسیون، در صورت لزوم باید جرم آن افزایش یا کاهش پیدا کند که از رزونانس در فرکانس کاری سیستم جلوگیری شود. معمولا حاشیه جدایش ۲۰٪ کافی است.
- ۴- انجام آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی، تحلیل نتایج و در صورت نیاز تغییر ابعاد فونداسیون.

۲- تحلیل فونداسیون با ابعاد اولیه آن (ارتفاع ۴۵ سانتیمتر)

مشخصات کمپرسور و الکتروموتور که فونداسیون برای آنها طراحی شده است، در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) مشخصات خاک و پی که فونداسیون روی آن بنا شده است، آمده است.

جدول ۱. پارامترهای کمپرسور و الکتروموتور

| پارامتر | توصیف | مقدار |
|------------------------|--------------------------------|--|
| m_c | جرم کمپرسور | 2000kg |
| m_R | جرم روتور سرعت بالا (HS) | 32.2kg |
| f | سرعت کاری (HS) | 25200rpm |
| f_c | سرعت بحرانی (HS) | دور اول=6565rpm دور دوم=34998rpm |
| e | خروج از مرکز جرم نامتعادل (HS) | 0.038mm |
| $F_0 = m_R e \omega^2$ | نیروی گریز از مرکز (HS) | 8522N |
| m_R | جرم روتور سرعت پایین (LS) | 374.6kg |
| f | سرعت کاری (LS) | 2980rpm |
| f_c | سرعت بحرانی (LS) | دور اول=1795rpm دور دوم=2095rpm دور سوم=27292rpm |
| e | خروج از مرکز جرم نامتعادل (LS) | 0.038mm |
| $F_0 = m_R e \omega^2$ | نیروی گریز از مرکز (LS) | 1386N |
| m_m | جرم موتور | 3300kg |

| | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 450kg | جرم روتور | m_R |
| 2980rpm | سرعت کاری | f |
| 0.038mm | خروج از مرکز جرم نامتعادل | e |
| 1665N | نیروی گریز از مرکز | $F_0 = m_R e \omega^2$ |
| 10300kg | جرم کل | m |
| $8522 \sin(2639t) + 3051 \sin(312t)N$ | نیروی گریز از مرکز در ماشین | C.G. |

جدول ۲. پارامتر خاک و پی (خاک، خاک رس با سفتی متوسط است)

| پارامتر | توصیف | مقدار |
|--------------|------------------------------|-----------------------|
| Y | تراکم خاک | $2000 \frac{kg}{m^3}$ |
| G | مدول برشی | 45Mpa |
| v | نسبت پواسون | 0.45 |
| D_{ψ_1} | نسبت میرایی داخلی خاک | 0.05 |
| S_{all} | ظرفیت باربری مجاز استاتیکی | 71.8kPa |
| --- | مقدار نشست در فشار تحمل مجاز | قابل چشم پوشی |

۲-۱ پیکربندی پایه

در یک پیکربندی آزمایشی، ابعاد به گونه ای انتخاب می شوند که مرکز ثقل ترکیبی ماشین ها و فونداسیون دقیقاً با مرکز ناحیه پی منطبق باشد. یک پیکربندی بلوک فونداسیون که این نیاز را برآورده می کند یک بلوک $۰,۴۵ \times ۲,۸ \times ۵,۵$ متر است.

جرم پایه ی پی (mf) : 13860kg و جرم کل (m) : 13860+10300=24160kg

$$\text{مساحت پایه مناسب است} \rightarrow 13860 \text{kg} < 0.5 \times S_{all} = 35.9 \text{kPa} \rightarrow \frac{24160 \times 9.81}{5.5 \times 2.8} = 15.4 \text{kPa} < 0.5 \times S_{all} = 35.9 \text{kPa}$$

$$\frac{\text{وزن پایه}}{\text{وزن دستگاه}} = \frac{13860}{10300} = 1.35 < 2 \rightarrow \text{وزن پایه مناسب نیست}$$

۲-۲ تجزیه و تحلیل دینامیکی

بررسی دینامیکی کامل در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. جدول نتایج تحلیل‌های دینامیکی

| گهواره ای | افقی | عمودی | شعاع معادل r_0 |
|--|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 2.21m | 2.21m | 2.21m | |
| $I_{\psi machine} = 18650 \text{kgm}^2$ $I_{\psi footing} = 9990 \text{kgm}^2$ $I_{\psi} = 28640 \text{kgm}^2$ | 24160kg | 24160kg | جرم و گشتاور جرمی اینرسی |
| $B_{\psi} = 0.122$ | $B_x = 0.216$ | $B_z = 0.154$ | نسبت جرم |
| $D_{\psi} = 0.3828$ | $D_x = 0.6197$ | $D_z = 1.083$ | نسبت میرایی هندسی |
| $D_{\psi_1} = 0.05$ | $D_{\psi_1} = 0.05$ | $D_{\psi_1} = 0.05$ | |
| Total=0.4328 | Total=0.6697 | Total=1.133 | |
| $\beta_{\psi} = 0.45$ | $\beta_x = 0.95$ | $\beta_z = 2.22$ | ضریب فنر |
| $k_{\psi} = 1587.6 \text{MN/m}$ | $k_x = 486.51 \text{MN/m}$ | $k_z = 712.79 \text{MN/m}$ | ثابت فنر معادل |
| $f_{n\psi} = 2248.3 \text{rpm}$ | $f_{nx} = 1355.1 \text{rpm}$ | $f_{nz} = 1640.2 \text{rpm}$ | فرکانس طبیعی |
| $f_{m\psi} = 1778.0 \text{rpm}$ | $f_{mx} = 434.9 \text{rpm}$ | غیر ممکن است ($2D^2 > 1$) | فرکانس تشدید |

| | | | |
|-----------------------|---|---|--|
| ضریب بزرگنمایی | (f=2890 rpm) M=0.2120 (f=25200 rpm) M=0.0042 | M=0.2068 M=0.0029 | M=0.7276 M=0.0080 |
| نیروی دینامیکی | (f=2890 rpm) F ₀ =3051N (f=25200 rpm) F ₀ =8522N | F ₀ =3051N F ₀ =8522N | F ₀ ×h=4015Nm F ₀ ×h=11215Nm |
| دامنه ارتعاش | (f=2890 rpm) Z = 0.907 × 10 ⁻⁶ m (f=25200 rpm) Z = 0.050 × 10 ⁻⁶ m | X = 1.30 × 10 ⁻⁶ m X = 0.051 × 10 ⁻⁶ m | Ψ = 1.84 × 10 ⁻⁶ rad Ψ = 0.057 × 10 ⁻⁶ rad |
| اجزای نوسان گهواره ای | (f=2890 rpm) Ψ × R _H = 2.57 × 10 ⁻⁶ m (f=25200 rpm) Ψ × R _H = 0.08 × 10 ⁻⁶ m | Ψ × R _V = 2.42 × 10 ⁻⁶ m Ψ × R _V = 0.075 × 10 ⁻⁶ m | |
| دامنه ارتعاش حاصل | Z _t = 3.61 × 10 ⁻⁶ m | X _t = 3.85 × 10 ⁻⁶ m | |
| عامل انتقال پذیری | (f=2890 rpm) T _r = 0.898 (f=25200 rpm) T _r = 0.149 | T _r = 0.643 T _r = 0.072 | T _r = 1.11 T _r = 0.078 |
| نیروی منتقل شده | (f=2890 rpm) P _v = 2741N (f=25200 rpm) P _v = 1249N P _{v,total} = 3990N | P _H = 1962N P _H = 615N P _{H,total} = 2577N | P _M = 4446Nm P _M = 875Nm P _{M,total} = 5321Nm |

۲-۳ چک لیست طراحی

بلوک فونداسیون برای معیارهای طراحی همانطور که توضیح داده شد، بررسی می‌شود.

۲-۳-۱ شرایط استاتیکی

۱- ظرفیت باربری استاتیکی: نسبت سطح پی برای ۵۰٪ فشار مجاز خاک. طبق بخش C بالا، مقدار 15.4kPa که کمتر از 35.9kPa است، قابل قبول است.

۲- نشست استاتیکی: نشست باید یکنواخت باشد. مرکز ثقل پی و بارهای ماشین باید در محدوده ۵٪ از هر یک از ابعاد خطی قرار داشته باشند. مرکز ثقل بارهای ماشین و فونداسیون باید با هم منطبق باشند که در این صورت وضعیت قابل قبول خواهد بود.

۳- ظرفیت باربری استاتیکی و دینامیکی: ضریب بزرگنمایی بارهای دینامیکی ترجیحاً باید کمتر از ۱.۵ باشد که طبق جدول (۳) این مقدار قابل قبول است. همچنین، مجموع بارهای استاتیکی و دینامیکی اصلاح شده نباید فشاری بیشتر از ۷۵٪ فشار مجاز خاک ایجاد کند. در اینجا محاسبات نشان می‌دهد که مقدار حاصل قابل قبول است.

$$15.4 + \frac{3.99}{5.5 \times 2.8} \pm 5.321 \times \frac{6}{5.5 \times 2.8^2} = 16.4kPa < 0.75 \times 71.8 = 53.8kPa$$

۴- نشست ناشی از بارهای استاتیکی و دینامیکی تکراری: مرکز ثقل ترکیبی بارهای دینامیکی و استاتیکی باید در محدوده ۵٪ از بعد خطی نسبت به مرکز ثقل پی قرار داشته باشد. برای حرکات نوسانی و چرخشی، محورهای نوسان و چرخش باید با محورهای اصلی پی منطبق باشند. مقدار نشست باید کمتر از میزان مجاز تغییر شکل سیستم لوله کشی متصل باشد. در این حالت، چون نیروهای دینامیکی در مقایسه با بارهای استاتیکی کوچک هستند، نشست ناشی از بارهای دینامیکی نادیده گرفته می‌شود.

۲-۳-۲ شرایط محدودیت‌های دینامیکی

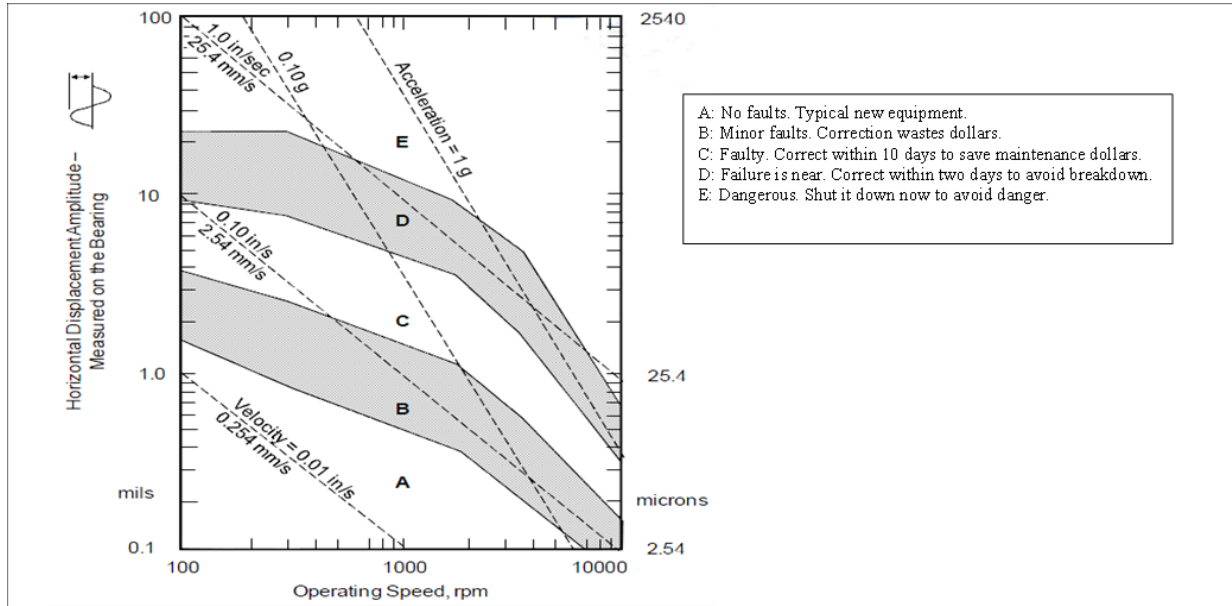
۱- دامنه ارتعاش در فرکانس کاری: حداکثر دامنه حرکت فونداسیون باید در ناحیه A یا B شکل (۱) برای فرکانس کاری مشخص قرار گیرد. دامنه ارتعاش عمودی Z_t است. بر اساس شکل (۱)، این مقدار در محدوده ایمن قرار دارد. دامنه ارتعاش افقی در مرکز ناحیه باربری X_t است. این دامنه در ناحیه A شکل (۱) قرار دارد و بنابراین، قابل قبول است.

$$Z_t = 3.61 \times 10^{-6}m \text{ at } 2980rpm \quad X_t = 3.85 \times 10^{-6}m \text{ at } 2980rpm$$

۲- سرعت ارتعاش برابر است با:

$$V = [(\omega_1 A_1)^2 + (\omega_2 A_2)^2]^{0.5}$$

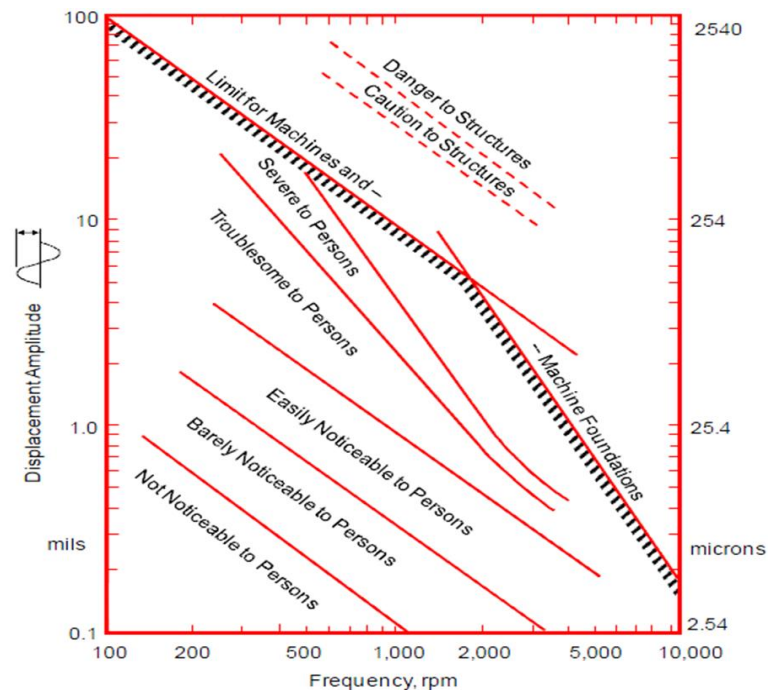
که در آن (ω_1) و (ω_2) فرکانس‌های کاری هستند و (A_1) و (A_2) جابجایی‌های ارتعاشی محاسبه‌شده در قسمت قبلی هستند. با مقایسه این مقدار با مقادیر محدودکننده در جدول (۴) و شکل (۱)، این سرعت حداقل در وضعیت "خوب" قرار می‌گیرد. سرعت محاسبه‌شده برابر با 0.00120 متر بر ثانیه است. طبق جدول (۴)، این سرعت در محدوده "عملکرد خوب" قرار دارد و بنابراین قابل قبول است.



شکل ۱. معیار ارتعاش برای ماشین‌های دوار [۱]

جدول ۴. جدول داده‌های کلی ماشین‌آلات-لرزش-شدت [۱]

| Peak Velocity (in/sec) | Machine Operation |
|------------------------|-------------------|
| <0.005 | Extremely smooth |
| 0.005-0.010 | Very smooth |
| 0.010-0.020 | Smooth |
| 0.020-0.040 | Very good |
| 0.040-0.080 | Good |
| 0.080-0.160 | Fair |
| 0.160-0.315 | Slightly rough |
| 0.315-0.630 | Rough |
| >0.630 | Very rough |



شکل ۲. محدودیت های کلی دامنه ارتعاش برای یک فرکانس خاص [۱]

۳- شتاب برابر با $4\pi^2 f^2 \times$ دامنه جابجایی است. باید برای منطقه B در شکل (۱) آزمایش شود.

توجه: در صورت احراز شرایط (۱) و (۲) که در مورد طراحی حاضر وجود داشت، بررسی این مورد ضروری نیست.

۴- ضریب بزرگنمایی: مقدار محاسبه شده M باید در فرکانس تشدید کمتر از ۱٫۵ باشد. در مورد ما، M در همه حالت ها کمتر از ۱٫۵ است.

۵- تشدید: فرکانس های عمل ماشین باید حداقل ۲۰٪ اختلاف با فرکانس رزونانس داشته باشند. $(0.8f_{m_r} \geq f \geq 1.2f_{m_r})$. در مورد طراحی حاضر، هیچ فرکانس رزونانسی در حالت عمودی وجود ندارد. در حالت افقی $1.2 \times 434.9 < 2980rpm$ و در حالت نوسانی $1.2 \times 1778.0 < 2980rpm$. بنابراین، شرایط تشدید رخ نمی دهد.

۶- عامل انتقال پذیری (معمولاً فقط برای ماشین های با فرکانس بالا اعمال می شود). مقدار انتقال پذیری با معادله زیر محاسبه می شود و معمولاً برای ماشین های دارای بلوک اینرسی باید کمتر از ۱ باشد.

$$Tr = r_d \sqrt{1 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

T_r : عامل انتقال پذیری؛ r_d : ضریب پاسخ تغییر شکل؛ ξ : نسبت میرایی؛ ω : فرکانس تحریک؛ ω_n : فرکانس طبیعی سیستم در مورد طراحی حاضر، برای حالت نوسانی، Tr بیش از ۱ است که نشان می دهد نیروهای دینامیکی در این حالت تقویت می شوند.

۳-۳-۲ حالت های ارتعاشی احتمالی

نوسان عمودی و انتقال افقی، حالت های ممکن هستند؛ زیرا نیرو ممکن است در آن جهت ها عمل کند. نوسان گهواره ای (ψ) نیز امکان پذیر است. زیرا نیروهای افقی بالای C.G عمل می کنند. با این حال، نوسان پیشی در نظر گرفته نمی شود، زیرا نیروهای افقی در صفحه افقی یک کوپل نیرویی تشکیل نمی دهند. جفت شدن حالت های انتقال افقی و تکان دادن نیز امکان پذیر است. به دلیل خطی بودن در معادلات حرکت، از اصل برهم نهی برای یافتن پاسخ کل استفاده می شود. نتایج در جدول (۳) فهرست شده است.

۳- محاسبه نیروهای وارد بر پیچ‌های اتصال سازه به فونداسیون

۳-۱ نیروهای استاتیکی

نیروی عمودی ناشی از وزن سازه (۱۰۳۰۰ کیلوگرم)

$$F_1 = 10300 \times 9.81 = 101043 \text{ N}$$

نیروی عمودی معادل ناشی از عدم قرار داشتن مرکز جرم سازه در خط مرکزی دو ردیف پیچ

$$F_2 = \pm F_1 \times 0.23 / 2.5 = \pm 0.09 F_1$$

نیروی عمودی معادل گشتاور کاری موتور

$$F_3 = \pm T / 2.5 = \pm 1009.4 / 2.5 = \pm 403.8 \text{ N}$$

تذکر: در هنگام راه اندازی، گشتاور به مراتب بیشتری به سازه منتقل می‌شود. مکاتبات با سازنده موتور برای بدست آوردن مقدار دقیق این گشتاور صورت گرفته و منتظر پاسخ هستیم. به هر حال، با استناد به گزارشات در دسترس، به عنوان تخمین معقول برای گشتاور راه‌اندازی موتور، مقداری حدود ۶ برابر مقدار گشتاور کاری موتور در حالت پایدار در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$F_{3Start} = 6F_3 = \pm 2423 \text{ N}$$

نیروی افقی (راستای x) ناشی از جریان سیال

$$F_4 = 1800 \text{ N}$$

نیروهای F_1 و F_4 به دو ردیف پیچ (۲۰ عدد) و سایر نیروها به یک ردیف پیچ (۱۰ عدد) وارد می‌شود. در بدترین حالت، نیروی استاتیکی وارد بر هر پیچ کمتر از مقدار $F_{ys,max}$ در راستای عمودی و $F_{Hs,max}$ در راستای افقی خواهد بود.

$$F_{ys,max} = \frac{F_1}{20} + \frac{F_2}{10} + \frac{F_{3Start}}{10} = 5340 \text{ N} \quad \text{و} \quad F_{Hs,max} = \frac{F_4}{20} = 90 \text{ N}$$

لازم به ذکر است که از وزن سیال کاری و نیروهای حرارتی، صرف‌نظر شده است. همچنین فرض می‌شود که لوله‌های رابط متصل به کمپرسور توسط نگهدارنده‌های خود مهار شده‌اند.

۳-۲ نیروهای دینامیکی

نیروی ناشی از نامیزانی شفت‌ها زیر طبق روابط بدست می‌آیند. لازم به ذکر است میزان نامیزانی شفت‌ها در بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شده است.

تذکر ۱: برای محاسبه مجموع نیروهای دینامیکی، تخمین ماکزیمم مقدار نیرو لحاظ شده است. همچنین این نیرو در پیچ‌های در موقعیت‌های مکانی مختلف، مقداری کمتر از این مقدار ماکزیمم را خواهد داشت.

۳-۳ نیروهای ناشی از زلزله

مطابق با استانداردها [۲-۴]، برای سازه‌های غیر ساختمانی که زمان تناوب نوسان اصلی آنها $(T=2\pi/\omega)$ کمتر از 0.5 sec است انجام تحلیل دینامیکی ضرورت ندارد. برای سازه مورد مطالعه، این مقدار کمتر از 0.04 sec است بنابراین از روش بار استاتیکی معادل استفاده می‌شود. همچنین مطابق با استانداردها، در مواردی که دوره تناوب اصلی کمتر از 0.06 sec است سازه صلب محسوب شده و نیروی جانبی ناشی از زلزله با رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$V = 0.3 \times S_{DS} \times W \times I$$

که در آن V نیروی برشی پایه، S_{DS} شتاب طیفی نظیر زمان تناوب کوتاه 0.2 ثانیه برحسب g ، W وزن سازه و I ضریب اهمیت سازه است. برای سازه مورد مطالعه، ضریب S_{DS} مطابق با استاندارد ASCE برابر با $2/3 \times 1.4 \times 1.5$ و میزان ضریب I برابر با 1.5 در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه داریم:

$$V = 0.3 \times 2/3 \times 1.4 \times 1.5 \times 1.5 \times W = 0.63W$$

اگرچه ضرورتی به اعمال نیرو در راستای عمود بر نیروی افقی وجود ندارد ولی برای اطمینان بیشتر می‌توان نیرویی معادل با $0.3V$ را در این راستا در نظر گرفت. به علاوه، نیروی قائم ناشی از زلزله به صورت زیر است:

$$E_v = 0.2 \times S_{Dg} \times W = 0.2 \times 2/3 \times 1.4 \times 1.5 \times W = 0.28W$$

تذکر: نیروهای فوق برای فونداسیون اصلاح شده (ارتفاع ۶۰ سانتیمتر) محاسبه شده است و به منظور افزایش ضریب اطمینان، فرض می‌شود تمام نیروها به پیچ‌ها منتقل شده است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

وزن فونداسیون در مقایسه با وزن سازه، در حالتی که ضخامت فونداسیون ۴۵ سانتیمتر باشد، کم خواهد بود (نسبت وزن فونداسیون به سازه ۱,۳۵ است). در نتیجه باید ابعاد تا اندازه‌ای تغییر کنند تا وزن فونداسیون به دو برابر وزن سازه افزایش یابد (البته این معیار تقریبی است و می‌تواند به طور دقیق رعایت نشود). مرکز جرم فونداسیون و سازه در راستای طولی حدود ۰,۳٪ و در راستای عرضی حدود ۰,۸٪ با یکدیگر فاصله نسبی دارند.

تذکر: در تحلیل صورت گرفته، چگالی بتن ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. همچنین به دلیل عدم دسترسی به خواص واقعی خاک، مقادیر پارامترهای مورد نیاز به صورت عمومی در نظر گرفته شده است و ممکن است اندکی با خواص واقعی خاک در محل نصب متفاوت باشد. فونداسیون در حالت فعلی (ابعاد ۵,۵، ۲,۸ و ۰,۴۵ متر) الزامات مورد نیاز را ارضا می‌کند ولی برای بهبود طراحی، پیشنهاد می‌شود که ارتفاع فونداسیون افزایش پیدا کند و بخشی از ضخامت آن در زیر خاک قرار داده شود. تمامی محاسبات استاتیکی و دینامیکی برای فونداسیون با ارتفاع ۶۰ نیز انجام شد و نتایج قابل قبولی در بر داشت. طبق محاسبات با افزایش ضخامت از ۴۵ سانتیمتر به ۶۰ سانتیمتر، نسبت وزن فونداسیون به سازه به ۱,۷۹ افزایش می‌یابد که البته با توجه به مناسب بودن نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی لزومی به افزایش بیشتر آن نیست.

مراجع

1. S. Arya, M. O'nill and G. Pincus, *Design of structures and foundations for vibrating machines*, Gulf publishing company, Houston, 1979.
2. *ASCE/SEI-7-16 Minimum design loads for buildings and other structures*, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia, 2016.
3. *Standard No. 2800: Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*, 4th Edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
4. *Iranian seismic design code for petroleum facilities and structures*, 3rd Edition, Code No.038-3rd final, 2018. (in Persian)