نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره هشتم / بهار ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 8 / June 2016

حل عددی نیروی‌های وارد بر فونداسیون و تغییر شکل سازه استاتور ژنراتورهای عمودی نیروگاه‌های برقآبی با ستون‌های فلزی مورب

پوریا اکبرزاده*[۱]
فاطمه سوهانی[۲]

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

چکیده

امروزه استفاده از بازوها و ستون‌های مورب در سازه ژنراتورهای برق‌آبی بزرگ، مزایایی نظیر انبساط حرارتی سازه بدون ایجاد تنش‌های مکانیکی بزرگ، کاهش نیروهای وارد بر فونداسیون و ممانعت از خروج از مرکزیت فاصله هوایی را به همراه دارد. در این تحقیق، استفاده از ستون‌های مورب در سازه استاتور یک ژنراتور برق‌آبی در مقایسه با یک استاتور سنتی با ستون‌های غیرمایل و شعاعی به کمک توسعه یک برنامه عددی المان‌محدود بومی برای اولین بار بررسی‌شده است. استفاده از این نرم‌افزار بومی، زمان مدل‌سازی سازه پیچیده ژنراتورهای بزرگ و تحلیل‌های سنگین و زمان‌بر نرم‌افزارهای تجاری را به‌شدت کاهش داده و کمک شایانی به طراحی مقدماتی و تحلیل سازه این ژنراتورها خواهد کرد. در این تحقیق تأثیر تعداد، ابعاد و زاویه ستون‌های مورب بر نیروی‌های فونداسیون و تغییر شکل سازه استاتور تشریح و مقادیر بهینه آن‌ها محاسبه‌شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فن‌آوری ستون‌های مورب، مزایای قابل‌توجهی در کاهش نیروهای فونداسیون، کاهش فرکانس‌های طبیعی و تغییر شکل یکنواخت سازه استاتور به همراه دارد. همچنین نتایج محاسبات یک ژنراتور ۱۷۰ مگاواتی نشان می‌دهد که در طراحی استاتور آن استفاده از ۸ پایه ۹۰۰ میلی‌متری با زاویه ۴۵ درجه، انتخابی مناسب است که تحت بارگذاری‌های مختلف، مقادیر قابل‌قبولی را برای نیروهای فونداسیون، جابه‌جایی حلقه‌های استاتور و فرکانس طبیعی به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی

ستون‌های مورب، نیروهای وارد بر فونداسیون، فرکانس طبیعی، استاتور ژنراتور برق‌آبی.

۱*. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، akbarzad@ut.ac.ir.
۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۴

مقدمه

ژنراتورهای برق‌آبی سازه‌های فلزی بزرگی هستند که برای رسیدن به راندمان بالا و ثبات در تولید توان الکتریکی با استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای در تلورانس‌های ابعادی خود مواجه هستند. در این ژنراتورها، وزن زیاد این سازه‌ها و بار حرارتی اعمال‌شده منجر به تغییر شکل چندین میلی‌متری و اعمال نیروهایی تا حد چندین هزار کیلو نیوتن می‌شود. این در حالی است که بزرگی این نیروها در شرایط خاص مانند اتصال کوتاه[۱]، خطا در سنکرون شدن ژنراتور با شبکه سراسری برق[۲] و اتصال به زمین روتور[۳] چندین برابر خواهد شد. درنتیجه در طراحی این دسته از ژنراتورها برای دستیابی به عملکردی مطمئن، ملاحظات ویژه‌ای در هم‌محوری روتور و استاتور، گپ‌ها در یاتاقان‌های هادی[۴]، هوابندها در سیستم تهویه داخل ژنراتور و شکاف هوایی[۵] باید در نظر گرفت (جانگزی[۶] و همکاران (۲۰۰۱)، کلمپنر و کرزنبام[۷] (۲۰۰۸)، سیموند[۸] و همکاران (۲۰۰۸)). یک ژنراتور در حین کارکرد تحت نیروهای متفاوتی قرار دارد. چنانچه این نیروها کوچک باشند، اجزای مکانیکال ژنراتور تحت تغییر شکل‌های الاستیک قرار خواهند گرفت که پس از برداشتن این نیروها، این تغییر شکل‌ها به حالت اولیه خود برمی‌گردند. درحالی‌که در شرایط بارگذاری شدید، چنانچه تمهیداتی در نظر گرفته نشود، این تغییر شکل‌ها به محدوده پلاستیک رفته و موجب تغییر خواص مواد تشکیل‌دهنده اجزای مهمی نظیر هسته استاتور گشته و خواص مغناطیسی آن را نیز تا حد زیادی تغییر خواهد داد (تانگ[۹]، ۲۰۱۴).

یکی از راه‌کارهای پیشرفته در جلوگیری از ایجاد تنش‌های زیاد روی قطعات ژنراتور و ممانعت از تبدیل تغییر شکل‌های الاستیک به پلاستیک، استفاده از المان‌های مورب فلزی[۱۰] نظیر صفحات و تیرهای فلزی به شکل مایل در ساختار سازه ژنراتورهای برق‌آبی به‌ویژه در براکت فوقانی[۱۱] و پایه‌های متصل به فونداسیون استاتور است. از ویژگی‌های مهم این فن‌آوری می‌توان به اجازه انبساط حرارتی سازه استاتور بدون تولید تنش‌های بزرگ مکانیکی، کاهش نیروهای اعمال‌شده روی فونداسیون، ممانعت از خروج از مرکزیت روتور و استاتور و همگن ماندن فاصله هوایی اشاره کرد. علاوه بر این، صفحات انعطاف‌پذیر مورب ذکرشده به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که برای دوری از پدیده رزونانس، فرکانس طبیعی سازه استاتور حتی به کمتر از یک‌دوم فرکانس توان تولیدی ژنراتور (فرکانس شبکه سراسری برق) برسد. درنتیجه در شرایط اتصال کوتاه، خطا در سنکرون شدن ژنراتور با شبکه سراسری برق، اتصال به زمین روتور و غیره نیز تغییر شکل‌ها در محدوده الاستیک باقی خواهند ماند (وایدمن و کلمبرگر[۱۲] (۱۹۶۷)، کلمپنر و کرزنبام (۲۰۰۴)، زاوو[۱۳] و همکاران (۲۰۰۸)).

کلمبرگر (۱۹۸۰ و ۱۹۸۶) به بررسی تحلیلی مزایا و معایب استفاده از المان‌های مورب در کاهش تنش‌های حرارتی و نیروهای تکیه‌گاهی برای یک مدل دوبعدی از استاتور ژنراتور پرداخت. بررسی ایشان حکایت از کاهش فراوان تنش‌های حرارتی و نیروهای تکیه‌گاهی داشت. فیسینگ[۱۴] و همکاران (۱۹۸۳) اثر استفاده از المان‌های مورب در انبساط حرارتی هم‌مرکز استاتور را در یک مدل دو-بعدی مورد ارزیابی قراردادند. آن‌ها اعلام کردند که در صورت استفاده از المان‌های فلزی مورب، نیروهای وارد فونداسیون تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. ساواتانی[۱۵] و همکاران (۱۹۸۶) پایداری استاتور و روتور ژنراتور با اجزای مورب را در مواجهه با میدان مغناطیسی به کمک نرم‌افزارهای تجاری بررسی کردند. در مطالعه‌ای مشابه، اسپیرس[۱۶] و همکاران (۱۹۹۶) فرکانس‌های پیچشی طبیعی استاتور با صفحات مایل را به کمک نرم‌افزارهای تجاری محاسبه کردند. زانگ و جیانگ[۱۷] (۲۰۰۰) به تحلیل تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و نیروهای وارده بر براکت فوقانی برای شرایط کارکردی یک ژنراتور عمودی برق‌آبی به کمک یک نرم‌افزار تجاری پرداختند. جانگزی و همکاران (۲۰۰۱) کاربرد صفحات مورب در عملکرد مناسب استاتور نیروگاه برق‌آبی تری-گورجز[۱۸] را تشریح کردند. آن‌ها نیز با استفاده از یک نرم‌افزار تجاری رفتار مکانیکی استاتور مذکور را با طرح مشابه سنتی

[1] Short Circuit
[2] Faulty-synchronization
[3] Rotor Earth Fault
[4] Guide Bearings
[5] Air Gap
[6] Gongzhi
[7] Klempner & Kerszenbaum
[8] Simond
[9] Tong
[10] Steel Oblique Elements
[11] Upper Bracket
[12] Wiedemann & Kellenberger
[13] Zhao
[14] Fiesenig
[15] Sawatani
[16] Sprysl
[17] Zhong & Jiang
[18] Three Gorges Hydro Power Plant

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

(استاتور با ستون‌های غیرمایل و شعاعی) مقایسه کردند. یائو و رائو[1] (۲۰۰۳) با استفاده از یک نرم‌افزار تجاری میدان سه‌بعدی حرارتی و انبساط حرارتی یک ژنراتور ۴۰۰ مگاواتی با اجزاء مورب را تحلیل کردند. لازم به توضیح است که در سال‌های اخیر استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به‌طور گسترده در تحلیل رفتار مکانیکی ژنراتورهای برق‌آبی توسط محققان مختلفی نظیر زانگ[2] (۲۰۱۱)، لی[3] و همکاران (۲۰۱۳)، کاپاشی[4] و همکاران (۲۰۱۴)، آزوج و میلان[5] (۲۰۰۶) و وانگ[6] و همکاران (۲۰۱۴) دیده می‌شود. مطالعات این افراد نیز حکایت از اثر مؤثر و فراوان استفاده از المان‌های فلزی مورب در عملکرد مطمئن و ایمن سازه استاتور ژنراتورهای برق‌آبی دارد.

همان‌طور که در بررسی کارهای تحقیقاتی گذشته مشاهده می‌شود، اغلب مطالعات و روش‌های تحقیقاتی مرتبط با رفتار مکانیکی ژنراتور، بر پایه نرم‌افزارهای تجاری استوار است؛ بنابراین لازم است که برای هر طرح یا پروژه جدید، یک مدل‌سازی سه‌بعدی مجزا با صرف هزینه زیاد و زمان حل طولانی در نظر گرفت که این روش نیز قادر به بررسی همه حالت‌ها و تحلیل جامع روی کمیت‌های مختلف هندسی ژنراتور نخواهد بود. ازاین‌رو در این تحقیق برای اولین بار یک روش عددی-تحلیلی (بدون بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تجاری) برای ارزیابی عملکرد مکانیکی استاتور ژنراتورهای برق‌آبی عمودی که از المان‌های مورب در طراحی و ساخت آن‌ها استفاده می‌شود، معرفی می‌شود. روش عددی-تحلیلی استفاده‌شده بر پایه ماتریس‌های سختی (المان‌محدود) بوده و برای سازه‌های سه‌بعدی قابل‌استفاده است. در این تحقیق تأثیر فن‌آوری صفحات مورب بر نیروهای فونداسیون، تغییر شکل سازه و فرکانس‌های طبیعی پیچشی با جزئیات کافی تشریح می‌گردد. تأثیر تعداد ستون‌های مورب، زاویه ستون‌ها و ابعاد هندسی آن بر کمیت‌های فوق‌الذکر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از فن‌آوری ستون مورب مزایای قابل‌توجهی در کاهش نیروهای وارد بر فونداسیون، کاهش فرکانس‌های طبیعی و تغییر شکل یکنواخت سازه استاتور به همراه دارد. لازم به توضیح است که با کاهش فرکانس طبیعی سازه ژنراتور و دور شدن آن از فرکانس تحریک شبکه سراسری برق (که در ایران ۵۰ هرتز است) احتمال بروز پدیده مخرب رزونانس کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شکل یکنواخت سازه استاتور، تغییر شکل یکنواخت و همگن فاصله هوایی روتور و استاتور را به همراه داشته که نقش بسیار مهمی در یکنواختی بارهای الکترومغناطیس و راندمان ژنراتور ایفا می‌کند.

مواد و روش‌ها

استاتور ژنراتور برق‌آبی

استاتور یک ژنراتور برق‌آبی یک سازه فلزی جوشکاری شده است که برای تحمل شرایط پیچش، کمانش و ارتعاش شدید طراحی و ساخته می‌شود. با توجه به شرایط حمل‌ونقل و خصوصیات مغناطیسی مورد درخواست مشتری و با در نظر گرفتن ابعاد هندسی، استاتور می‌تواند به‌صورت چند بخش جوشکاری شده در کارخانه تولید و درنهایت در محل نصب توسط پیچ و مهره مونتاژ گردد. سازه استاتور روی صفحات مدفون و مهارشده در فونداسیون قرارگرفته و توسط پیچ و مهره به آن متصل می‌گردد. سازه استاتور باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

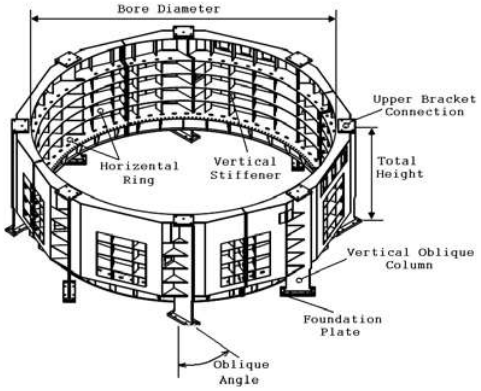
- موقعیت مناسب برای نصب هسته استاتور فراهم باشد؛
- قابلیت تحمل وزن کل سازه، سیم‌پیچ‌ها، هسته استاتور، براکت فوقانی و یاتاقان‌های هادی فراهم باشد؛
- قابلیت انتقال گشتاورها و بارهای شعاعی مغناطیسی به فونداسیون را داشته باشد و
- اجازه انبساط حرارتی هسته استاتور بدون ایجاد تنش‌های حرارتی وجود داشته باشد.

مطابق شکل (۱)، معمولاً سازه فلزی استاتور ژنراتورهای برق‌آبی عمودی متشکل از تعدادی صفحه حلقوی افقی[7]، ستون‌های عمودی[8]، تقویت‌کننده‌های عمودی[9] و صفحات فونداسیون است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ستون‌های عمودی می‌توانند به‌صورت مورب و تحت زاویه انحراف[10]

[1] Yao & Rao
[2] Zhang
[3] Li
[4] Kapashi
[5] Azuaje & Millan
[6] Wang
[7] Horizental Rings
[8] Verical Columns
[9] Verical Stiffeners
[10] Oblique Angle

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

ساخته شوند. همچنین براکت فوقانی که از یک حلقه دایره‌ای و تعدادی بازوی شعاعی (تعداد بازوها با تعداد ستون‌های استاتور برابر است) تشکیل‌شده است روی نشیمنگاه‌های فوقانی ستون استاتور[1] با پیچ و مهره متصل می‌شود. جدول (۱) مشخصات هندسی استاتور موردبررسی را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): تصویر شماتیک سازه استاتور ژنراتور برق‌آبی

جدول (۱): مشخصات هندسی استاتور موردبررسی

توان ژنراتور (مگاوات)	۱۷۰
سرعت روتور (دور بر دقیقه)	۱۸۷/۵
فرکانس شبکه (هرتز)	۵۰
تعداد حلقه‌های استاتور	۶
تعداد ستون‌های استاتور	۸
قطر داخلی استاتور[2] (میلی‌متر)	۸۱۰۰
ارتفاع کل استاتور (میلی‌متر)	۳۷۳۰
مدول الاستیسیته فولادی (گیگا پاسکال)	۲۱۰
ضریب پواسن فولاد	۰/۳

معادلات حاکم و روش حل

روش مورداستفاده برای توسعه روابط حاکم بر مسئله و پیش‌بینی رفتار مکانیکی استاتور و براکت فوقانی، مدل‌سازی کل سازه معرفی‌شده مطابق شکل (۲-الف) به‌صورت یک سری تیر افقی، عمودی و دایره‌ای است. مطابق شکل (۲-ب) ماتریس سختی یک حلقه دایره‌ای به شعاع R با n بخش مساوی (n گره باfاصله یکسان از همدیگر) که هر گره تحت اعمال شش نیرو و گشتاور یکسان قرار دارد در شکل بی‌بعد به‌صورت زیر ارائه می‌شود (گاوین[3](۱۹۹۶)، اسپیریدون[4](۱۹۹۴)، باربر[5](۱۹۷۸)):

$$\begin{pmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \\ \bar{F}_3 \\ \bar{M}_1 \\ \bar{M}_2 \\ \bar{M}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & -k_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 \\ 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \bar{\delta}_3 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix} \quad (۱)$$

که در معادله (۱)، k_1 الی k_4 ضرایب سختی هستند که به شکل زیر محاسبه می‌شوند (به‌عنوان‌مثال جزئیات مربوط به محاسبه k_1در انتهای این بخش آورده شده است):

$$k_1 = 2sin^2\left(\frac{\pi}{n}\right)\left\{\left(\frac{1+\zeta}{\bar{A}}+\frac{1}{\bar{I}_x}\right)\frac{\pi}{2n} + \frac{1}{4}\left(\frac{1-\zeta}{\bar{A}}+\frac{1}{\bar{I}_x}\right)sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \frac{n}{\pi\bar{I}_x}sin^2\left(\frac{\pi}{n}\right)\right\}^{-1} \quad (۲)$$

$$k_2 = sin^2\left(\frac{\pi}{n}\right)\left\{\left(\frac{1+\zeta}{\bar{A}}+\frac{1}{\bar{I}_z}\right)\frac{\pi}{2n} - \frac{1}{4}\left(\frac{1-\zeta}{\bar{A}} + \frac{1}{\bar{I}_z}\right)sin\left(\frac{2\pi}{n}\right)\right\}^{-1} \quad (۳)$$

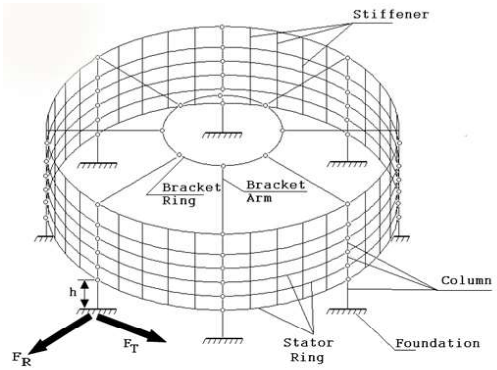
$$k_3 = sin^2\left(\frac{\pi}{n}\right)\left\{\frac{\pi}{n}\left(\frac{1+\nu}{\bar{J}}+\frac{1}{2\bar{I}_x}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{1+\nu}{\bar{J}} - \frac{1}{2\bar{I}_x}\right)sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \frac{2(1+\nu)}{\bar{J}}\bar{\beta}\,sin\left(\frac{\pi}{n}\right)\right\}^{-1} \quad (۴)$$

$$k_4 = 2sin^2\left(\frac{\pi}{n}\right)\left\{\frac{\pi}{n}\left(\frac{1+\nu}{\bar{J}}+\frac{1}{2\bar{I}_x}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{1+\nu}{\bar{J}} - \frac{1}{2\bar{I}_x}\right)sin\left(\frac{2\pi}{n}\right)\right\}^{-1} \quad (۵)$$

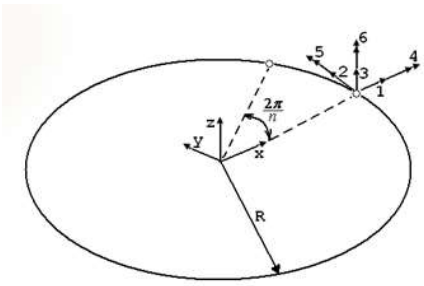
که در روابط (۲) الی (۵)، $\bar{F} = F/(ER^2)$، $\bar{M} = M/(ER^3)$، F= نیرو، M= ممان خمشی، E= مدول الاستیسیته فولاد، $\bar{A} = A/R^2$، A= سطح مقطع حلقه، $\bar{I}_x = I_x/R^4$، $\bar{I}_z = I_z/R^4$، I_xوI_z=ممان دوم سطح مقطع حلقه، $\bar{J} = J/R^4$، J= ممان سطح قطبی، ν=ضریب پواسن فولاد، $\bar{\beta} = n\bar{A}\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)\pi(\bar{A}+\bar{J}\alpha_S)$ $\zeta = 2(1+\nu)\alpha_s$، α_S= ضریب تغییر شکل برشی، $\bar{\delta} = \delta/R$، δ= جابه جایی گره و θ= پیچش گره.

[1] Upper Bracket Connection
[2] Bore Diameter
[3] Gavin
[4] Spiridon
[5] Barber

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]



(الف)



(ب)

شکل (۲): الف) مدل‌سازی سازه استاتور و ب) یک حلقه فلزی با n بخش مساوی

همچنین ماتریس سختی یک تیر عمودی (که همان صفحات عمودی استاتور هستند) بین دو گره از دو حلقه مجاور یک ماتریس 12×12 است که به شکل زیر بیان می‌شود:

$$K_C = \begin{pmatrix} 0 & b & 0 & 0 & 0 & c & 0 & -b & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 & -e & 0 & 0 & 0 & -d \\ 0 & 0 & 0 & f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e & 0 & g & 0 & 0 & 0 & e \\ 0 & c & 0 & 0 & 0 & l & 0 & -c & 0 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & -b & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & -d & 0 & e & 0 & 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & -f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e & 0 & q & 0 & 0 & 0 & e \\ 0 & c & 0 & 0 & 0 & p & 0 & -c & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c \\ 0 & -e & 0 \\ -f & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 \\ 0 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c \\ 0 & e & 0 \\ f & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & l \end{pmatrix} \quad (۶)$$

که درایه‌های ماتریس K_C در جدول (۲) معرفی‌شده‌اند:

جدول (۲): معرفی درایه‌های ماتریس K_C

درایه ماتریس K_C	مقدار
a	$\bar{A}/\bar{L}$
b	$12\bar{I}_z/[\bar{L}^3(1+\phi_z)]$
c	$\bar{L}b/2$
d	$12\bar{I}_y/[\bar{L}^3(1+\phi_y)]$
e	$\bar{L}d/2$
f	$\bar{J}/[2(1+\nu)\bar{L}]$
g	$(4+\phi_y)\bar{L}^2d/12$
p	$(2-\phi_z)\bar{L}^2d/12$

همچنین در جدول (۲) داریم: $\phi_y = 24\bar{I}_y(1+\nu)/(\alpha_S\bar{A}\bar{L}^2)$ و $\phi_z = 24\bar{I}_z(1+\nu)/(\alpha_S\bar{A}\bar{L}^2)$ و $\bar{L} = L/R$ که L= طول ستون عمودی بین دو گره از دو حلقه مجاور. با در نظر گرفتن تعداد حلقه‌های استاتور (m) و تعداد ستون‌های عمودی استاتور (n) و ماتریس سختی هر یک از آن‌ها مطابق روابط (۱) و (۶) و درنهایت استفاده از روش‌های روش المان‌محدود، ماتریس سختی کل سازه (K_T) به دست می‌آید. درنتیجه معادله نهایی به شکل $\vec{F} = [K_T]\vec{\delta}$ به کمک شرایط مرزی و شرایط اجباری در هر گره محاسباتی نظیر صفر بودن جابه‌جایی و چرخش در جهات x (شعاعی)، y (مماسی) و z(عمودی) برای گره موجود در فونداسیون و صفر بودن چرخش در جهت شعاعی و مماسی برای گره‌هایی که جوشکاری شده‌اند (اتصال ستون و حلقه) و غیره (حل کرد و مجهولاتی بر نیرو روی فنداسیون یا جابه‌جایی شعاعی و مماسی گره‌ها روی حلقه استاتور را محاسبه نمود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، معمولاً سازه استاتورها متشکل از یک‌سری از صفحات فولادی متصل شده توسط جوش یا پیچ و مهره هستند؛ بنابراین، روشن است که در تحلیل و طراحی جزئی آن مناسب است که از یک نرم‌افزار تجاری المان‌محدود و با در نظر گرفتن المان‌های نوع پوسته[1] در شبکه‌بندی هندسه سه‌بعدی آن استفاده کرد. بااین‌حال، با استفاده از روش ماتریس سختی برگرفته از المان‌های تیر[2] (مشابه مطالعه حاضر) می‌توان به نتایج تقریبی اما با سرعت بیشتری رسید، به‌ویژه هنگامی‌که قرار است برآورد اولیه در مرحله طراحی پایه[3] ارائه گردد. لازم به ذکر است که این نتایج تقریبی از دقت نسبتاً خوبی برخوردارند. چراکه در ژنراتورهای برق‌آبی بزرگ، اعضای سازه استاتور (حلقه‌ها و ستون‌ها) نسبت لاغری[4] مناسب دارند و استفاده از المان تیر برای آن مناسب

[1] Shell Elements
[2] Beam Elements
[3] Basic Design
[4] Slenderness Ratio

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

است (به‌عنوان‌مثال حلقه استاتور در این مورد مطالعاتی دارای قطر میانگین ۸۳۰۰ میلی‌متر بوده درحالی‌که سطح مقطع حلقه مستطیلی به ابعاد ۱۵ در ۴۰۰ میلی‌متر است).

جزئیات محاسبه ضریب k_1

مطابق شکل (۳) یک حلقه با n گره محاسباتی را در نظر بگیرید که هر گره تحت یک جابه‌جایی یکسان شعاعی قرار دارد. اگر F نیروی شعاعی، N_0 نیروی کششی داخلی و M_0 گشتاور خمشی در مقطعی بین دو گره مجاور و θ زاویه‌ای دلخواه باشد، با توجه به تعادل نیروها خواهیم داشت:

$$N_0 = \frac{F}{2\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \qquad (۷)$$

نیروی کششی (N)، گشتاور خمشی (M) و نیروی برشی (V) در محل زاویه θ به ترتیب برابر خواهد شد با $N = N_0\cos(\theta)$، $M = M_0 - N_0R[1-\cos(\theta)]$ و $V = N_0\sin(\theta)$. انرژی تغییر شکل (U) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U = \frac{1}{2}\left(\int_0^{\pi/n}\frac{M^2}{EI_x}Rd\theta + \int_0^{\pi/n}\frac{N^2}{EA}Rd\theta + \alpha_S\int_0^{\pi/n}\frac{V^2}{GA}Rd\theta\right) \qquad (۸)$$

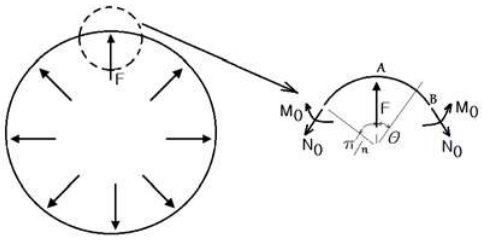
روشن است که به دلیل تقارن در شکل مسئله، نقطه B جابه‌جایی چرخشی ندارد؛ بنابراین با توجه به قضیه کاستیگلیانو[1] خواهیم داشت $dU/dM_0 = 0$ که حل این معادله نتیجه خواهد داد:

$$M_0 = N_0R\left[1 - \frac{n}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)\right] \qquad (۹)$$

تمام گره‌های محاسباتی (نظیر نقطه A) در اثر نیروی F، جابه‌جایی شعاعی δ را تجربه می‌کنند که با توجه به قضیه کاستیگلیانو خواهیم داشت $dU/dF = n\delta$ یعنی:

$$2n\int_0^{\pi/n}\left(\frac{M}{EI_x}\frac{dM}{dF} + \frac{N}{EA}\frac{dN}{dF} + \alpha_S\frac{V}{GA}\frac{dV}{dF}\right)Rd\theta = n\delta \qquad (۱۰)$$

با حل معادله (۱۰) مقدار δ به دست می‌آید. با توجه به تعریف کمیت‌های بی‌بعد و رابطه $k_1 = \bar{F}/\bar{\delta}$ می‌توان رابطه (۲) را نتیجه گرفت.



شکل (۳): یک حلقه فلزی با nگره محاسباتی

شرایط بارگذاری

در این تحقیق دو شکل بارگذاری مهم و اصلی روی ژنراتورهای برق‌آبی در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری اول که با نماد LC1 نمایش داده می‌شود عبارت است از نیروی عمودی روی استاتور و گشتاور اتصال کوتاه در فاصله هوایی و بارگذاری دوم که با نماد LC2 نمایش داده می‌شود عبارت است از افزایش درجه حرارت روی ریم-شیت‌های[2] استاتور. در این دو بارگذاری، مقادیر نیروی شعاعی (F_R) و نیروی مماسی (F_T) روی فونداسیون و جابه‌جایی شعاعی و مماسی حلقه فوقانی و پایینی استاتور مطابق شکل (۲-الف) محاسبه می‌شود. در اینجا برای ژنراتور با مشخصات مندرج در جدول (۱)، نیروی عمودی که شامل وزن کل اجزاء دوار (محور و روتور ژنراتور) و نیروی هیدرولیکی رو به پایین توربین است و روی براکت فوقانی اعمال می‌گردد حدود ۵۸۰۰ کیلو نیوتن، گشتاور واردشده روی کل سازه استاتور در اثر اتصال کوتاه حدود ۷۴۰۰۰ کیلونیوتن-متر و همچنین افزایش درجه حرارت ایجادشده در ریم-شیت‌ها حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته‌شده است. لازم به ذکر است که اعداد مربوط به بارگذاری به مقادیر واقعی یک چنین ژنراتوری که با توجه به محاسبات الکترومغناطیسی و هیدرولیکی به دست می‌آید، بسیار نزدیک است.

نتایج

در این بخش، برای ژنراتور برق‌آبی ۱۷۰ مگاواتی مذکور، تأثیر زاویه انحراف ستون‌های عمودی استاتور، تعداد ستون‌های استاتور و طول ستون بخش پایه (طول h مطابق شکل (۲-الف)) بر نیروهای وارده روی فونداسیون، جابه‌جایی شعاعی و مماسی بالاترین و پایین حلقه استاتور و فرکانس طبیعی پیچشی کل سازه استاتور برای هر دو مورد بارگذاری بررسی

[1] Castigliano's Theorem
[2] Rim-Sheets

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

می‌گردد. علاوه بر این، یک زیربخش نیز برای نشان دادن اعتبار نتایج این مطالعه در نظر گرفته‌شده است.

اعتبارسنجی محاسبات

به‌منظور اعتبارسنجی روش محاسباتی در این تحقیق، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش عددی ذکرشده با نتایج حاصل از یک نرم‌افزار تجاری المان‌محدود (یعنی ANSYS) مقایسه شده است. شرایط هندسی مطابق جدول (۱)، طول ستون بخش پایه (h) برابر ۹۰۰ میلی‌متر و بارگذاری مطابق حالت LC1 در نظر گرفته‌شده است. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار تجاری مذکور از المان تیر با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل برشی[1] استفاده‌شده است. نتایج مقایسه‌ای مربوط به نیروی شعاعی فونداسیون (F_R) در جدول (۳) نمایش داده‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انطباق بسیار خوبی بین نتایج روش این مطالعه و نتایج نرم‌افزاری وجود دارد.

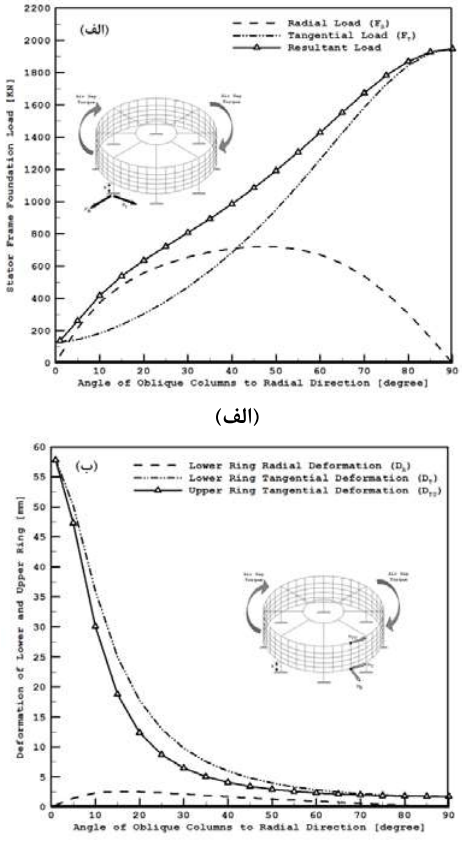
جدول (۳): مقایسه نیروی شعاعی فونداسیون بین نتایج عددی (مطالعه حاضر) و شبیه‌سازی نرم‌افزاری

زاویه انحراف ستون (درجه)	F_R(KN) مطالعه حاضر	F_R(KN) نتایج نرم‌افزاری
۱۰	۳۷۵/۰۱	۳۷۵/۰۳
۲۰	۵۵۸/۳۲	۵۵۸/۴۳
۳۰	۶۵۶/۰۱	۶۵۶/۱۲
۴۵	۶۷۵/۵۳	۶۷۵/۷۲
۵۰	۷۲۰/۷۴	۷۲۱/۰۵
۶۰	۶۷۱/۰۲	۶۷۰/۹۱
۷۰	۵۳۷/۷۳	۵۳۷/۷۲
۸۰	۳۰۵/۱۲	۳۰۵/۱۸

تأثیر زاویه انحراف ستون‌ها

شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب چگونگی تغییر نیروهای روی فونداسیون و جابه‌جایی شعاعی و مماسی بالاترین و پایین‌ترین حلقه استاتور را با افزایش زاویه انحراف ستون‌های استاتور برای حالت بارگذاری LC1 نمایش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای زاویه انحراف صفر درجه (آرایش شعاعی ستون‌های استاتور به‌عنوان سنتی و مرسوم)، نیروی مماسی فونداسیون به بیشترین مقدار خود یعنی حدود ۲۰۰۰ کیلو نیوتن رسیده و برای زاویه انحراف ۹۰ درجه (آرایش مماسی ستون‌ها)، تغییر شکل مماسی غیرقابل‌قبول حدود ۶۰ میلی‌متری ایجاد خواهد شد.

این در حالی است که برای زاویه انحراف ۴۵ درجه، مقادیر معقول و قابل قبولی هم برای نیروهای فونداسیون شعاعی و مماسی و هم برای جابه‌جایی شعاعی و مماسی بالاترین و پایین حلقه استاتور به دست می‌آید. همچنین شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که در زاویه انحراف ۴۵ درجه، فرکانس طبیعی پیچشی برای استاتور با طول ستون بخش پایه (h) برابر ۹۰۰ میلی‌متر، حدود ۴۰ درصد فرکانس طبیعی شبکه سراسری برق بوده که به لحاظ رزونانس در منطقه ایمنی قرار دارد. به‌علاوه مطابق شکل (۵-ب) که مربوط به بارگذاری حالت LC2 است، نیروهای فونداسیون برای زوایای انحراف بیشتر از ۴۵ درجه تغییر چندانی نکرده و نرخ کاهشی اندکی دارند؛ بنابراین با توجه به موارد مطرح‌شده، زاویه انحراف ۴۵ درجه می‌تواند زاویه مناسب و بهینه‌ای برای طراحی ستون‌های سازه استاتور محسوب شود.



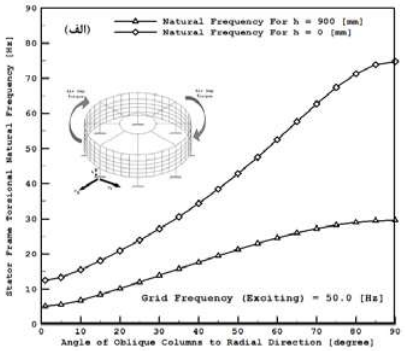
شکل (۴): تأثیر زاویه انحراف ستون‌ها برای حالت بارگذاری LC1 الف) نیروهای فونداسیون شعاعی و مماسی و ب) جابه‌جایی شعاعی و مماسی حلقه‌های تحتانی و فوقانی

[1] Shear Deformation Effect

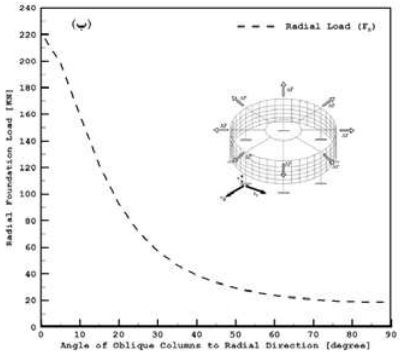
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

تأثیر تعداد ستون‌ها

شکل (۶) تأثیر تعداد ستون‌های استاتور بر نیروهای روی فونداسیون و جابه‌جایی شعاعی و مماسی بالاترین و پایین‌ترین حلقه استاتور را برای حالت بارگذاری LC1 و زاویه انحراف ۴۵ درجه نمایش می‌دهد. روشن است که با افزایش تعداد ستون‌ها و درنتیجه افزایش تعداد فونداسیون‌ها، نیروها روی تعداد بیشتری از فونداسیون‌ها تقسیم می‌شوند و هر فونداسیون سهم کمتری از کل نیرو را دریافت می‌کند. بااین‌وجود همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، روند کاهش نیروهای روی فونداسیون با افزایش تعداد ستون‌ها برای بارگذاری حالت LC1 چشمگیر نیست. از طرفی با افزایش تعداد ستون‌ها، سختی[1] استاتور نیز افزایش می‌یابد و درنتیجه مطابق شکل (۶-ب) جابه‌جایی‌های شعاعی و مماسی بالاترین و پایین‌ترین حلقه استاتور نیز کاهش می‌یابد. با توجه به کاهش نه‌چندان زیاد نیروها و جابه‌جایی‌های ناشی از افزایش تعدد ستون‌ها و از طرفی افزایش هزینه‌های مرتبط با افزایش تعداد ستون‌ها و فونداسیون‌های آن، انتخاب همان ۸ ستون (مطابق جدول ۱) منطقی و مناسب است.



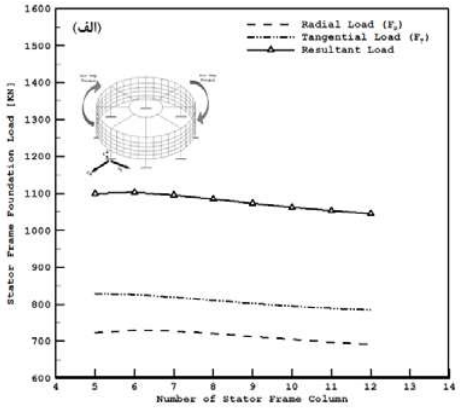
(الف)



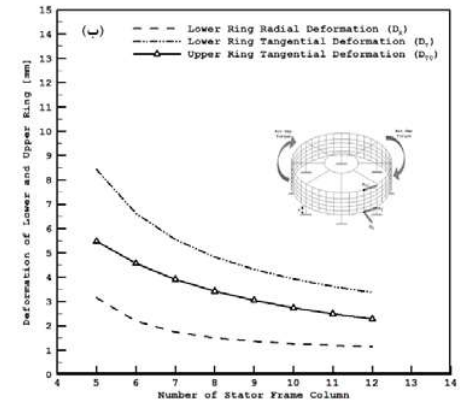
(ب)

شکل (۵): تأثیر تعداد ستون‌ها برای استاتور با زاویه انحراف ۴۵ درجه در حالت بارگذاری LC2 الف) فرکانس طبیعی پیچشی سازه استاتور و ب) نیروی فونداسیون شعاعی

همچنین شکل (۷-الف) نشان می‌دهد استاتوری با تعداد ۸ ستون با طول ستون بخش پایه (h) برابر ۹۰۰ میلی‌متر و زاویه انحراف ۴۵ درجه، فرکانس طبیعی پیچشی حدود ۴۰ درصد فرکانس طبیعی شبکه سراسری برق بوده که به لحاظ رزونانس در منطقه ایمنی قرار دارد. به‌علاوه مطابق شکل (۷-ب) که مربوط به بارگذاری حالت LC2 است، نیروهای فونداسیون استاتوری با تعداد ۸ ستون در حدود ۴۵ کیلو نیوتن بوده که ازنظر مسائل بارگذاری ساختمانی عددی مناسب است؛ بنابراین با توجه به موارد مطرح‌شده، انتخاب هشت عدد ستون برای استاتور موردبررسی می‌تواند عددی مناسب و بهینه برای طراحی سازه استاتور محسوب شود.



(الف)



(ب)

شکل (۶): تأثیر تعداد ستون‌ها برای استاتور با زاویه انحراف ۴۵ درجه در حالت بارگذاری LC1 الف) نیروهای فونداسیون شعاعی و مماسی و ب) جابه‌جایی شعاعی و مماسی حلقه‌های تحتانی و فوقانی

تأثیر طول ستون بخش پایه

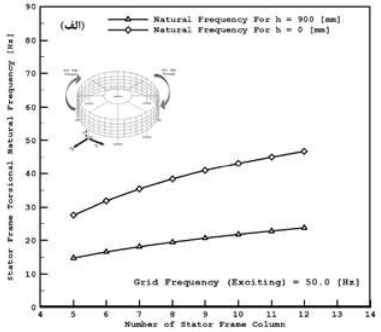
شکل (۸) تأثیر طول ستون بخش پایه استاتور بر نیروهای روی فونداسیون و جابه‌جایی شعاعی و مماسی حلقه‌های تحتانی و

[1] Stiffness

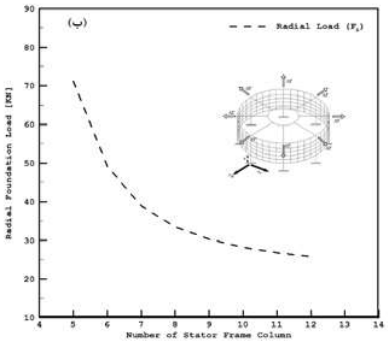
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

فوقانی استاتور را برای استاتوری با ۸ ستون و زاویه انحراف ۴۵ درجه در حالت بارگذاری LC1 نمایش می‌دهد. روشن است که میزان انبساط شعاعی و مماسی سازه استاتور به میزان خاصیت الاستیک کل سازه بستگی دارد و با توجه به اینکه سازه در نقطه پایه به فونداسیون‌ها اتصال صلب دارد، این انبساط کاملاً متقارن محوری است. بااین‌وجود چنانچه نیروی ناشی از انبساط حرارتی بین دو حلقه مجاور از یک حد مشخصی بیشتر باشد، امکان رخ دادن کمانش بین حلقه‌های استاتور دور از ذهن نیست. هر چه استاتور صلب‌تر و خاصیت الاستیک آن کمتر باشد احتمال رخداد کمانش نیز بیشتر است چراکه یک سازه استاتور صلب که اجازه انبساط حرارتی (شعاعی یا مماسی) کمی دارد، تحت تنش‌های حرارتی بیشتری نیز قرار دارد. در این خصوص واضح است که هرچه طول ستون بخش پایه استاتور کوتاه‌تر باشد، سختی سازه استاتور نیز بیشتر شده و تنش‌های حرارتی و متعاقب آن احتمال کمانش نیز بیشتر خواهد بود. لذا انتخاب طول مناسب برای h اهمیت ویژه‌ای دارد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود$h = 900$ میلی‌متر، انتخابی است که هم نیروهای روی فونداسیون و هم میزان جابه‌جایی شعاعی و مماسی در وضعیت مطلوبی قرار دارند.



(الف)

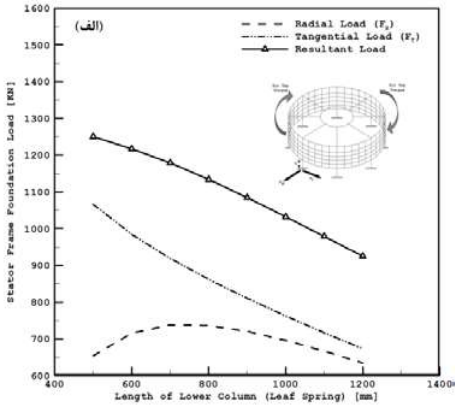


(ب)

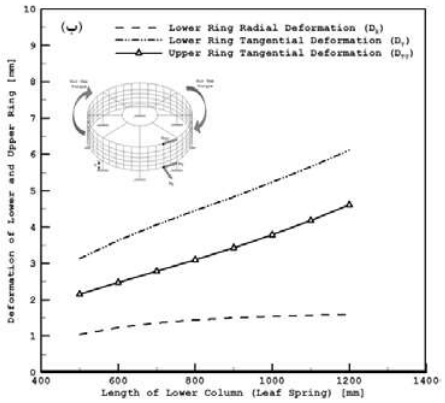
شکل (۸): تأثیر طول ستون بخش پایه برای استاتوری با ۸ ستون و زاویه انحراف ۴۵ درجه در حالت بارگذاری LC1 الف) نیروهای فونداسیون شعاعی و مماسی و ب) جابه‌جایی شعاعی و مماسی حلقه‌های تحتانی و فوقانی

این انتخاب در شکل (۹-الف) نیز نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی پیچشی حدود ۴۰ درصد فرکانس طبیعی شبکه سراسری برق بوده که به لحاظ رزونانس در منطقه ایمنی قرار دارد. به‌علاوه مطابق شکل (۹-ب) که مربوط به بارگذاری حالت LC2 است، نیروهای فونداسیون برای استاتوری با تعداد هشت ستون با زاویه انحراف ۴۵ درجه طول و ستون بخش پایه (h) برابر ۹۰۰ میلی‌متر، حدود ۴۰ کیلو نیوتن بوده که ازنظر مسائل بارگذاری ساختمانی عددی مناسب است.

شکل (۷): تأثیر زاویه انحراف ستون‌ها برای حالت بارگذاری LC2 الف) فرکانس طبیعی پیچشی سازه استاتور و ب) نیروی فونداسیون شعاعی



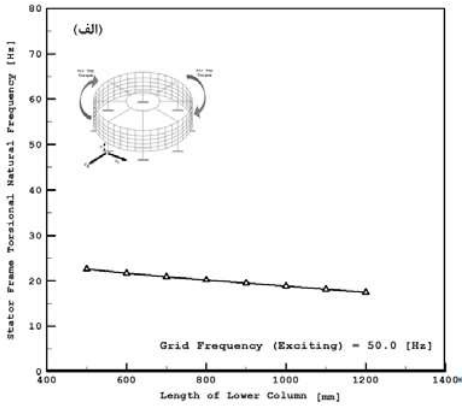
(الف)



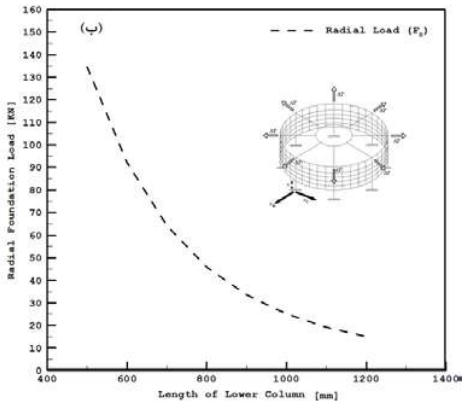
(ب)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]



(الف)



(ب)

شکل (۹): تأثیر طول ستون بخش پایه برای استاتوری با ۸ ستون و زاویه انحراف ۴۵ درجه در حالت بارگذاری LC2 الف) فرکانس طبیعی پیچشی سازه استاتور و ب) نیروی فونداسیون شعاعی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اولین بار یک روش عددی-تحلیلی (بدون بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تجاری) برای ارزیابی عملکرد مکانیکی استاتور ژنراتورهای برق‌آبی عمودی که از المان‌های مورب در طراحی و ساخت آن‌ها استفاده می‌شود، معرفی می‌گردد. روش عددی-تحلیلی استفاده‌شده بر پایه ماتریس‌های سختی (المان‌محدود) بوده و برای سازه‌های سه‌بعدی قابل‌استفاده است. در این تحقیق تأثیر فن‌آوری صفحات مورب بر نیروهای فونداسیون، تغییر شکل سازه و فرکانس‌های طبیعی پیچشی با جزئیات کافی تشریح می‌گردد. تأثیر تعداد ستون‌های مورب، زاویه ستون‌ها و ابعاد هندسی آن بر کمیت‌های فوق‌الذکر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج محاسبات که برای یک ژنراتور ۱۷۰ مگاواتی ارائه‌شده است نشان می‌دهد که زاویه انحراف ۴۵ درجه نقطه‌ای بهینه برای انتخاب صفحات مورب در طراحی ستون استاتور است که مقادیر معقول و قابل قبولی هم برای نیروهای فونداسیون شعاعی و مماسی و هم برای جابه‌جایی شعاعی و مماسی بالاترین و پایین حلقه استاتور به دست می‌آید.

مراجع

1- Azuaje, C. and Millan, A. (2006). “Stator Deformation of Large Hydrogenerators and its Effects on the Machines.” *IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition*, Latin America 15-18 Aug, 1-5.

2- Barber, J. R. (1978). “Force and Displacement Influence Functions for the Circular Ring.” *Journal of Strain Analysis*. 13(2), 77-81.

3- Fiesenig, K., Starcevic, M. and Fust, A. (1983). “New Design Features for Large Hydro-Electric Generators.” *Brown Boveri Review*. 70(7/8), 258-267.

4- Gavin, H. P. (1996). “Bicycle Wheel Spoke Patterns and Spoke Fatigue.” *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. 122(8), pp.736–742.

5- Gongzhi, L., Zhihe, L., Fuerst, D. and Schafer, D. (2001). “Application of Oblique Elements to Three Gorges Project,” *Proceedings of The Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Shenyang, china, 18-20 August,1, 116-122.

6- Kapashi, G., Mulimani, P., Veeranna, D. K. and Dodamani, S. P. (2014). “Finite-Element Optimization of Stator by Casted and Welded Structures.” *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 3(3), 432-442.

7- Kellenberger, W. (1980). “The Optimum Angle for the Support of Vertical Hydro-Electric Generators with Skew Arms or Skew Leaf Springs.” *Brown Boveri Review*. 67(2), 3-11.

8- Kellenberger, W. (1986). “Developments in Hydro-Electric Generator Components,” *IEEE Proceedings C- Generation, Transmission and Distribution*, 133(3), 137-141.

9- Klempner, G. and Kerszenbaum, I. (2008). *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, 2nd Edition, Joun Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, U.S.A.

10- Klempner, G. and Kerszenbaum, I. (2004). *Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators*, Joun Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, U.S.A.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

11- Li, Z., Yang, F., Si, G., Wang, D., Deng, Y. and Ma, B. (2013). "Analysis on Out-of-Roundness of Low-Head Hydrogenerator under Operation Condition." *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.* 29(24), 79-85.

12- Sawatani, K., Sano, K. and Ootake, S. (1986). "Stator Frame Deformation Problem in Large Diameter Hydro-Generators." *Power Engineering Review, IEEE*. 6(3), 30-31.

13- Simond, J. J., Xuan, M. T. and Wetter, R. (2008). "An Innovative Inductive Air-Gap Monitoring System for Large Low Speed Hydro-Generators, Tests in Operation." *IAHR 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems,* October 27-31.

14- Spiridon, M. W. (1994). "Desenvolvimento de Um ElementoAxi-Simetrico Para Estruturas Com EsforcosSimetricos e Anti-Simetricos." (in Portuquese), M. S. Thesis, Campo Montenegro Sao Jose Dos Campos, SP, Brasil.

15- Sprysl, H., Vgele, H. and Ebi, G. (1996). "The Influence of Magnetic Forces on the Stability Behavior of Large Electrical Machines." *VDI Berichte*, Nr. 1285.

16- Tong, W. (2014). *Mechanical Design of Electric Motors*, CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, U.S.A.

17- Wang, F. L., Tang, G. J. and Ke, M. Q. (2014). "Calculation on Stator Core Dynamic Characteristics of 600MW Turbo-Generator Based on FEM." *Applied Mechanics and Materials*. 635-637, 131-138.

18- Wiedemann, E. and Kellenberger, W. (1967). *Konstruktion Elektrischer Maschinen*, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, New York, U.S.A.

19- Yao, R. and Rao, F. (2003). "Analysis of 3D Thermal Field and Deformation in the Stator of Large Hydro-Generators." *IEEE 2003 The Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems.* 2,714-716.

20- Zhang, J. G. (2011). "Study on Evaluation Method of Stator and Rotor Deformation of Hydro-Generator," *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station.* 64*(*2), 10-13.

21- Zhao, J., Jia, J., He, X. and Wang, H. (2008). "Post-Buckling and Snap-Through Behavior of Inclined Slender Beams," *Journal of Applied Mechanics*. 75(4),1-7.

22- Zhong, S. and Jiang, P. (2000). "Setting Angle Calculation of Skew Leaf Springs for Stator Frame of Hydrogenerator." *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*. 6,20–22.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

Numerical Solution of Foundation Loads and Structural Deformation in Stator Frame of Vertical Hydrogenerators with Oblique Steel Columns

Pooria Akbarzadeh [1*]
Fatemeh Sohani [2]

Abstract

Nowadays, using oblique arms and columns in the structure of large hydrogeneratorshas many advantages such as thermal expansion without large mechanical stresses, foundation-load reduction, and oval air-gap prevention. In this research the use of oblique-columns in the stator-frame of a large hyrogenerator in comparison to a traditional stator-frame with radial columns is investigated for the first time by developing a Finite-Element inhouseprogram.The use of this software reduces the time of modeling of complex structures of large hydrogeneratorsand heavy analysis of commercial softwares significantly, and helps to develop a preliminary design and structural analysis of these generators.In this research, the effect of numbers, dimensions, and angle of oblique columns on foundation loads and structural deformation in stator-framesare described and the optimum values are obtained. The results of the study have shown that, the technology of oblique-column has significant advantages in reducing foundation forces, natural-frequencies and uniform structural deflections.Moreover, the computational results of a 170MW generator,have shown that in design of its stator, using 8oblique-columns of 900mm with angle of 45^{o}is a suitable selection where, under various loading-conditions, a reasonable value for foundation loads, deflection of stator rings, and natural-frequency is obtained.

Keywords

Oblique Columns, Foundation Loads, Natural Frequency, Hydrogenerators Stator Frame.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.5.3]

1* Assistant professor, Shahrood University of Technology, akbarzad@ut.ac.ir.
2 Ph.D Student, Shahrood University of Technology.
Received: 2016/04/14 Accepted: 2016/05/24