



ISAV2024

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



مدل سازی و تحلیل ارتعاشات آزاد یک مجموعه سلول فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه ردیاب دو محوره

محمد رضا گلرسان^ا، عباس مزیدی^{ب*}، محمد مهدی جلیلی^ب

^اایران، یزد، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد.

^بایران، یزد، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amazidi@yazd.ac.ir

چکیده

سیستم‌های فتوولتائیک و ردیاب‌های خورشیدی پر استفاده‌ترین نوع تاسیسات در نیروگاه‌های خورشیدی هستند. یکی از مشکلات این سیستم‌ها، امکان تخریب آن‌ها توسط وزش باد و پدیده‌های ارتعاشاتی ناشی از آن است. لذا درک درست خصوصیات ارتعاشی این سیستم‌ها در جلوگیری از مشکلات احتمالی بسیار مهم است. در این پژوهش مدل‌سازی و تحلیل ارتعاشات آزاد یک مجموعه سلول فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه ردیاب دو محوره انجام شده است. برای این منظور، یک سیستم ردیاب دو محوره صنعتی انتخاب شده و مدل‌سازی آن انجام شده است. اکثر مدل‌های ارائه داده شده برای تحلیل پنل‌های خورشیدی نصب شده بر روی پایه، مدل‌های یک درجه آزادی هستند. اما در این پژوهش سه درجه آزادی شامل حرکت‌های افقی و عمودی پنل و حرکت چرخشی آن در نظر گرفته شده است. در واقع خصوصیات الاستیک پایه و سیستم ردیاب خورشیدی بصورت دو فنر و دمپر طولی در امتداد‌های افقی و عمودی مدل‌سازی شده است. همچنین جک برقی تنظیم کننده زاویه پنل‌های خورشیدی، بصورت یک فنر و دمپر طولی مدلسازی شده است. پارامترهای مربوط به مدل مانند ضرایب سفتی به کمک شبیه‌سازی استاتیکی پایه و ردیاب خورشیدی در نرم‌افزارهای المان محدود استخراج شده است. معادلات حرکت با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده و به کمک روش‌های عددی و با کمک نرم‌افزار متلب حل شده است. اثرات خصوصیات مختلف پایه و ردیاب بر فرکانس‌های طبیعی و پاسخ زمانی پنل‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش زاویه پنل نسبت به افق، علاوه بر اثراتی که در برخی مودها بر دمپینگ و یا دامنه نوسانات می‌گذارد، محدوده فرکانس‌های طبیعی را در تمامی مودها کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: پنل فتوولتائیک، ردیاب خورشیدی، پاسخ زمانی، فرکانس طبیعی.

۱- مقدمه

تقاضای جهانی انرژی در سال ۲۰۵۰ با فرض رشد ثابت اقتصاد جهانی می‌تواند در محدوده ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ اگزاژول برآورد شود که برای دانشمندان و محققین این سوال مطرح است که این تقاضای انرژی چگونه می‌تواند تامین شود. سوخت‌های فسیلی نمی‌توانند بیشتر از چند دهه آینده مورد استفاده قرار بگیرند و از طرفی با توجه به چالش‌های پیرامون استفاده از انرژی هسته‌ای، یکی از بهترین راهکارها برای تامین انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر است [۱]. انرژی خورشیدی با توجه به پتانسیل بالا و فراگیری آن در تمام زمین و همچنین در دسترس بودن آن طی قرن‌های آینده مهم‌ترین منبع انرژی تجدید پذیر است. برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی بصورت برق باید به سمت پنل‌های فتوولتائیک رفت که در آن اثر فتوولتائیک یا تولید الکترون‌های آزاد با استفاده از انرژی ذرات نور رخ می‌دهد که اصول این عملیات و فناوری‌های مرتبط در بسیاری از پژوهش‌ها شرح داده شده است. سیستم‌های فتوولتائیک و ردیاب‌های خورشیدی پر استفاده‌ترین نوع تاسیسات در نیروگاه‌های خورشیدی هستند. این ردیاب‌های خورشیدی سازه‌های باریکی هستند که در نواحی روبراز نصب شده‌اند که گاهی در معرض بادهایی با سرعت بالا قرار دارند. یکی از مشکلاتی که پیرامون این پنل‌ها وجود دارد، امکان تخریب توسط پدیده‌های ارتعاشاتی است. در واقع در سال‌های اخیر اغلب اتفاقات شکست در این سازه‌ها مربوط به پدیده‌های ارتعاشاتی است که دامنه تغییر شکل بسیار بالایی ایجاد می‌کنند و می‌توانند در سرعت‌های خاص باد و زوایای شیب پنل خورشیدی ایجاد شوند. مطالعات زیادی در مورد آیرودینامیک پنل و مکانیزم ردیاب انجام شده است. کوسا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ پژوهشی به منظور بررسی اثر استفاده از مکانیزم‌های مختلف ردیابی خورشید بر عملکرد سیستم پنل فتوولتائیک و پارامترهای اصلی مؤثر بر مقدار انرژی الکتریکی خروجی آن‌ها انجام داده‌اند [۲]. طراحی سیستم‌های فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است، بارکر^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک ردیاب خورشیدی دو محوره بدون سنسور را طراحی کردند که در آن محرک‌ها در یک پیکربندی تی شکل با محورهای نصب شده که دو درجه آزادی را فراهم می‌کنند قرار داده شده است [۳]. تیرمیکچی^۳ و یاوز^۴ در سال ۲۰۱۵ یک ردیاب خورشیدی دو محوره با جک را طراحی کردند. استفاده از جک مخصوصا برای تنظیم زاویه برای پنل دو محوره می‌تواند راهکاری اثربخش باشد اما در این طرح علاوه بر زاویه ارتفاع، زاویه سمت پنل نیز با جک تنظیم می‌شود [۴]. فتح‌آبادی در سال ۲۰۱۶ یک ردیاب خورشیدی دو محوره بدون سنسور را طراحی کرد که در آن زوایای ارتفاع و سمت توسط دو جعبه دنده تنظیم می‌شدند [۵]. الحمومی^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ یک مکانیزم دو محوره به منظور کنترل پنل فتوولتائیک توسط دو موتور سروو طراحی کردند. حرکت موتورها بر مبنای بالاترین شدت نور خورشید دریافت شده توسط سنسورهای حساس به نور که در چهار گوشه پنل فتوولتائیک قرار داشت، انجام می‌شد [۶]. پولونگان^۶ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ برای مدلسازی سیستم فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه، یک مدل یک درجه آزادی جرم و فنر و دمپر ارائه دادند [۷]. این گروه همچنین در سال ۲۰۱۹ یک مدل یک درجه آزادی دیگر ارائه داده بودند که در آن فنر پیچشی به کار رفته بود [۸]. در هر دوی این مدل‌ها مانند اکثر مدل‌سازی‌ها محل اتصال پایه و پنل، بدون درجه آزادی انتقالی در نظر گرفته شده است.

با توجه به مباحث مطرح شده به نظر می‌رسد تاکنون مدلسازی دینامیکی جامع پنل‌های فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه و سیستم ردیاب خورشیدی انجام نشده است. در این پژوهش سعی شده است مدلسازی و تحلیل ارتعاشات آزاد یک سیستم فتوولتائیک نصب شده بر روی سیستم ردیاب دو محوره انجام شود که مقدمه‌ای برای تحلیل هر نوع پدیده ارتعاشی در پنل‌های فتوولتائیک خواهد بود.

¹ Koussa

² Barker

³ Tirmikci

⁴ Yavuz

⁵ El Hammoumi

⁶ Pulungan

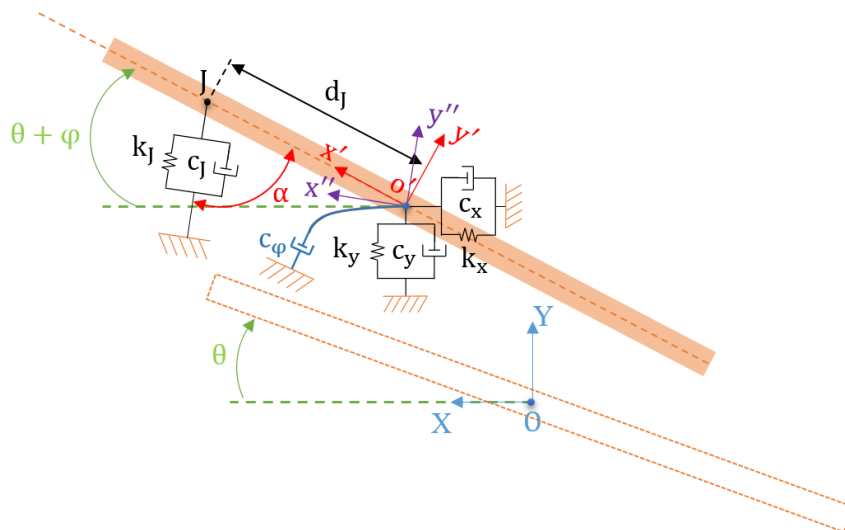
۲- مدل‌سازی سیستم

اغلب طرح‌های ارائه شده در پژوهش‌های گذشته برای سیستم‌های ردیاب خورشیدی هنوز در مرحله آزمایشگاهی هستند و تجاری نشده‌اند. در این پژوهش، طرح ارائه شده در شکل (۱) برای تحلیل انتخاب شده است. این طرح که یک سیستم ردیاب دو محوره می‌باشد از جک و موتور برای جهت‌گیری پنل‌ها استفاده می‌کند و یکی از مزایای آن نسبت به طرح‌های دیگر این است که نمونه‌های مشابه آن صنعتی شده و صرفاً یک طرح آزمایشگاهی نیست. چرخش حول پایه اصلی سیستم توسط موتور و گیربکس (رنگ آبی) انجام می‌گیرد و زاویه پنل نسبت به افق نیز توسط یک جک برقی (رنگ نارنجی) تنظیم می‌شود.



شکل ۱. طرح پایه ردیاب دو محوره قابل تنظیم با جک و یک موتور.

مدل ارائه شده در این پژوهش برای مجموعه پنل‌های خورشیدی در شکل (۲) قابل مشاهده است. این مدل یک مدل سه درجه آزادی با مختصات‌های تعمیم یافته x ، y و φ است. در این مدل سه دستگاه مختصات استفاده شده است که دستگاه مختصات XY دستگاه ثابت و چسبیده به زمین، دستگاه $x'y'$ دستگاه مختصات متحرک منطبق با حرکت پنل و دستگاه $x''y''$ نیز دستگاه مختصات متحرک منطبق با حرکت جک است. نقطه O محل اتصال پایه‌ی سیستم ردیاب به پنل خورشیدی است. نقطه J محل اتصال جک به پنل خورشیدی است. زاویه جک با پنل خورشیدی که یک زاویه متغیر می‌باشد با α نمایش داده شده است و θ نیز زاویه‌ای مشخص است که جهت‌گیری پنل را معین می‌کند. اثر اتصال پنل و پایه با فنرها و دمپرها k_x ، k_y ، c_x ، c_y و c_φ اعمال شده است، اثر اتصال جک و پنل نیز با فنر و دمپر k_r و c_r اعمال شده است. در شکل (۲) حالت خط‌چین پنل قبل از تغییر شکل الاستیک و حالت توپر بعد از تغییر شکل را نشان می‌دهد که هر سه مختصات تعمیم یافته x ، y و φ مخالف صفر هستند.



شکل ۲. مدل سه درجه آزادی مجموعه پنل خورشیدی نصب شده بر روی ردیاب دو محوره

۱-۲ پارامترهای سیستم

ابعاد و جرم پایه از بررسی نمونه‌های تجاری بدست آمده و برای بدست آوردن ضرایب سفتی k_x و k_y یک شبیه‌سازی از پایه سیستم ردیاب در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. به این منظور در محل اتصال پایه و پنل چندین بارگذاری متمرکز در جهات x و y اعمال شده و میزان جابجایی حاصل از بارگذاری‌ها استخراج شده تا به کمک قانون هوک بتوان مقادیری با تخمین مناسب برای ضرایب سفتی k_x و k_y استخراج کرد. برای اختصاص دادن یک مقدار به k_r ، جک متصل به پنل بصورت میله یک سر گیردار مدل شده است، با توجه به ارتباط طول جک با زاویه پنل‌ها، روابط مربوط به سفتی میله یک سر گیردار بصورت عبارتی وابسته به θ استخراج شده و در جدول (۱) قابل مشاهده است. دیگر پارامتر بسیار مهمی که برای استخراج معادلات حرکت لازم است، پارامتر α است. با فرض خطی بودن رابطه α با زاویه پنل‌ها یک عبارت برای α بدست آمده که این عبارت به همراه تمامی پارامترهای مورد نیاز در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی سیستم ردیاب

پارامتر (نماد)	اندازه	واحد
d_r (فاصله محل اتصال جک با محل اتصال پایه سیستم)	۰/۸	m
I_{xx} (x ممان اینرسی حول محور)	۱۲۱۶	$kg \cdot m^2$
I_{yy} (y ممان اینرسی حول محور)	۵۶۶	$kg \cdot m^2$
$I_{zz} = I_p$ (z ممان اینرسی حول محور)	۶۵۲	$kg \cdot m^2$
m_p (جرم مدل)	۴۳۵	kg
α (زاویه جک با پنل)	$-\frac{2}{3}(\theta + \varphi) + \frac{\pi}{2}$	rad
k_x (x سفتی پایه در جهت)	$4/95 \times 10^5$	N/m
k_y (y سفتی پایه در جهت)	$3/46 \times 10^8$	N/m
k_r (سفتی جک)	$\frac{4/96 \times 10^7}{0/695 \times \theta + 7/2 \times 10^{-2}}$	N/m
c_x (x میرایی پایه در جهت)	۴۹۵	$N \cdot s/m$
c_y (y میرایی پایه در جهت)	$3/46 \times 10^5$	$N \cdot s/m$
c_φ (میرایی پیچشی پایه)	۱۰	$N \cdot s/rad$
c_r (میرایی جک)	$\frac{4/96 \times 10^4}{0/695 \times \theta + 7/2 \times 10^{-2}}$	$N \cdot s/m$

۲-۲ معادلات حرکت

فرم نهایی معادلات حرکت برای مدل ارائه شده در شکل (۲) که با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده بصورت رابطه (۱) بدست آمده است. همان‌طور که مشخص است به دلیل اینکه مدل دارای سه درجه آزادی است، سه معادله که مربوط به مختصات‌های تعمیم یافته x ، y و φ است استخراج شده که هر کدام در رابطه (۱) کاملاً مشخص است.

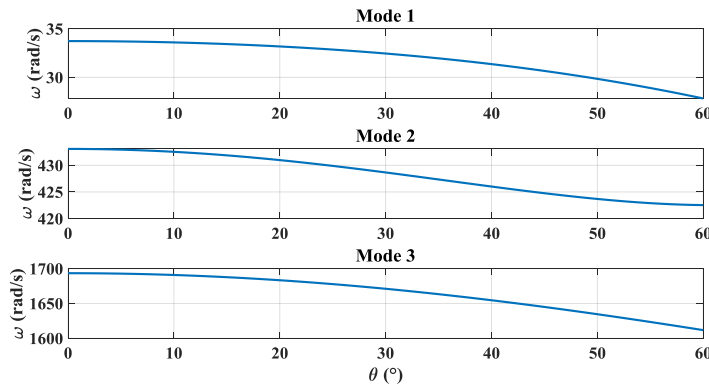
$$\begin{aligned}
 & m_p \ddot{x} + k_x x - k_J \sin \frac{(\theta + \varphi)}{3} \left(-x \sin \frac{(\theta + \varphi)}{3} + y \cos \frac{(\theta + \varphi)}{3} + d_J \left\{ \sin \frac{2(\theta + \varphi)}{3} - \sin \frac{2\theta - \varphi}{3} \right\} \right) \\
 & + c_x \dot{x} - c_J \sin \frac{\theta + \varphi}{3} \left(-\dot{x} \sin \frac{\theta + \varphi}{3} + \dot{y} \cos \frac{\theta + \varphi}{3} + d_J \dot{\varphi} \cos \frac{2(\theta + \varphi)}{3} \right) = 0 \\
 & m_p \ddot{y} + k_y y + k_J \cos \frac{(\theta + \varphi)}{3} \left(-x \sin \frac{(\theta + \varphi)}{3} + y \cos \frac{(\theta + \varphi)}{3} + d_J \left\{ \sin \frac{2(\theta + \varphi)}{3} - \sin \frac{2\theta - \varphi}{3} \right\} \right) \\
 & + c_y \dot{y} + c_J \cos \frac{\theta + \varphi}{3} \left(-\dot{x} \sin \frac{\theta + \varphi}{3} + \dot{y} \cos \frac{\theta + \varphi}{3} + d_J \dot{\varphi} \cos \frac{2(\theta + \varphi)}{3} \right) = 0 \quad (1) \\
 & I_p \ddot{\varphi} + k_J \left(-\frac{x}{3} \cos \frac{(\theta + \varphi)}{3} - \frac{y}{3} \sin \frac{(\theta + \varphi)}{3} + d_J \left\{ \frac{2}{3} \cos \frac{2(\theta + \varphi)}{3} + \frac{1}{3} \cos \frac{2\theta - \varphi}{3} \right\} \right) \\
 & \left(-x \sin \frac{(\theta + \varphi)}{3} + y \cos \frac{(\theta + \varphi)}{3} + d_J \left\{ \sin \frac{2(\theta + \varphi)}{3} - \sin \frac{2\theta - \varphi}{3} \right\} \right) + c_\varphi \dot{\varphi} + \\
 & c_J d_J \cos \frac{2(\theta + \varphi)}{3} \left(-\dot{x} \sin \frac{\theta + \varphi}{3} + \dot{y} \cos \frac{\theta + \varphi}{3} + d_J \dot{\varphi} \cos \frac{2(\theta + \varphi)}{3} \right) = 0
 \end{aligned}$$

۳- پاسخ سیستم

معادلات بدست آمده در رابطه (۱) با استفاده از روش‌های عددی و به کمک نرم‌افزار متلب حل شده و در این بخش به عنوان نمونه، اثر پارامترهای θ و k_J بر فرکانس‌های طبیعی و پاسخ زمانی سیستم بررسی می‌شود. این بررسی‌ها در سه مود مختلف انجام شده است که مود اول مربوط به x ، مود دوم مربوط به y و مود سوم مربوط به φ است.

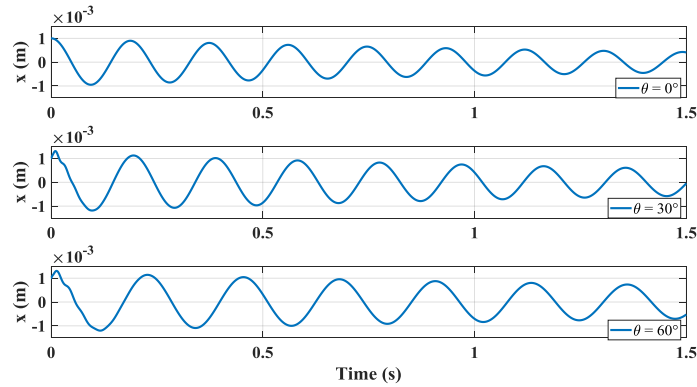
۱-۳ اثر θ بر فرکانس‌های طبیعی و پاسخ زمانی سیستم

اثر θ بر فرکانس طبیعی سیستم در سه مود مختلف آن در شکل (۳) قابل مشاهده است. با افزایش θ فرکانس طبیعی در هر سه مود کاهش یافته است.

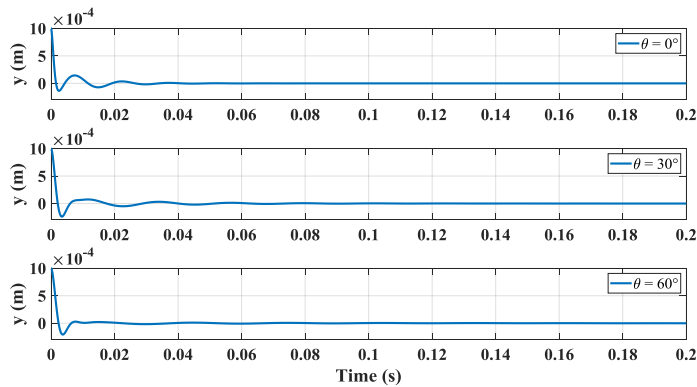


شکل ۳. اثر θ بر فرکانس‌های طبیعی سیستم در سه مود مختلف.

در شکل (۴) پاسخ زمانی سیستم در مود اول و در سه مقدار مختلف θ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشخص بود با افزایش θ فرکانس سیستم کاهش پیدا کرده است. همچنین در شکل (۵) پاسخ زمانی سیستم در مود دوم و به ازای سه مقدار مختلف θ قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش θ اثر دمپینگ نیز افزایش می‌یابد.

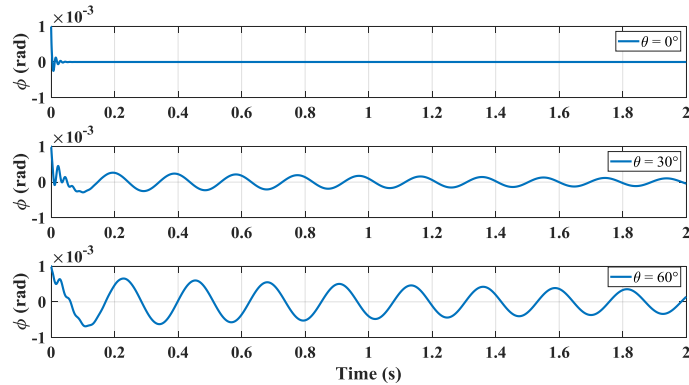


شکل ۴. پاسخ زمانی مود اول در سه θ مختلف.



شکل ۵. پاسخ زمانی مود دوم در سه θ مختلف.

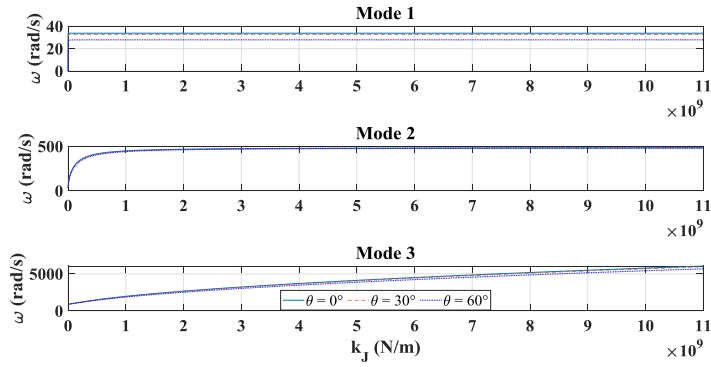
شکل (۶) پاسخ زمانی مود سوم سیستم را به ازای سه θ مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است افزایش θ در مود سوم سیستم بیشترین تاثیر را بر دامنه نوسانات می‌گذارد.



شکل ۶. پاسخ زمانی مود سوم در سه θ مختلف.

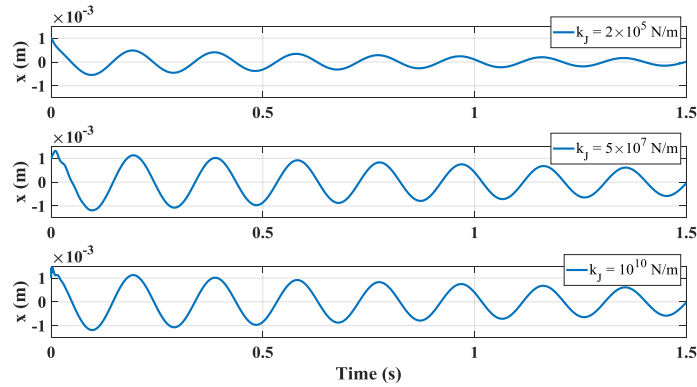
۳-۲ اثر k_r بر فرکانس‌های طبیعی و پاسخ زمانی سیستم

اثر k_r بر فرکانس طبیعی سیستم در سه مود مختلف آن در شکل (۷) قابل مشاهده است. یک نکته مهم که باید به آن اشاره شود این است که اثر k_r بر فرکانس طبیعی سیستم به علت اینکه k_r یک عبارت وابسته به θ است در سه θ مختلف با سه بزرگی متفاوت برای k_r بررسی شده است اما در بررسی اثر k_r بر پاسخ زمانی سیستم تنها بزرگی k_r متغیر است و θ در مقدار ۳۰ درجه ثابت در نظر گرفته شده است.



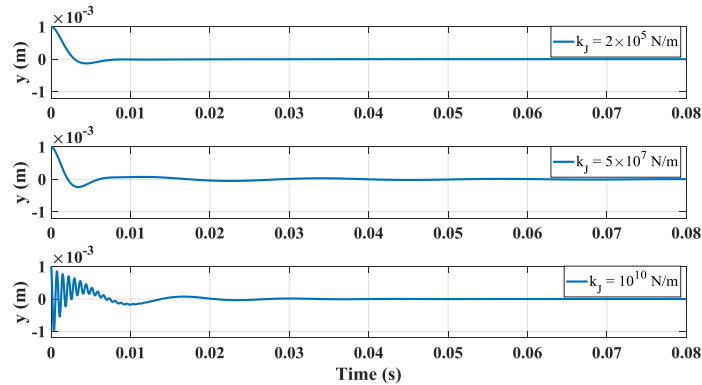
شکل ۷. اثر k_j بر فرکانس‌های طبیعی سیستم در سه مود مختلف.

در شکل (۸) پاسخ زمانی سیستم در مود اول و در سه k_j مختلف قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل (۷) هم مشخص بود افزایش k_j تاثیر چندانی بر فرکانس مود اول نمی‌گذارد ولی روی دامنه نوسان تاثیر گذار بوده است.



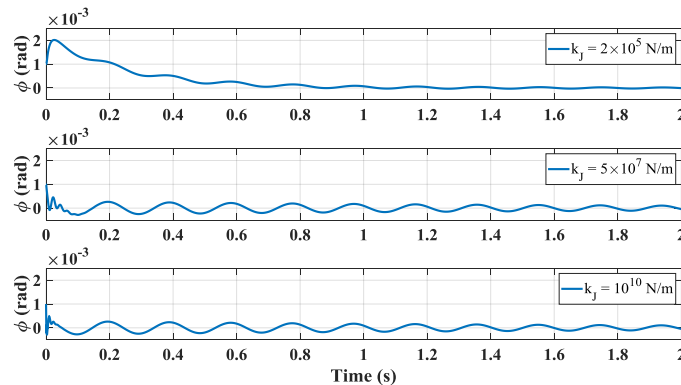
شکل ۸. پاسخ زمانی مود اول در سه k_j مختلف.

در شکل (۹) پاسخ زمانی سیستم در مود دوم و در سه k_j مختلف قابل مشاهده است.



شکل ۹. پاسخ زمانی مود دوم در سه k_j مختلف.

در شکل (۱۰) پاسخ زمانی سیستم در مود سوم و در سه k_j مختلف قابل مشاهده است. اثر k_j بر تغییر فرکانس، دامنه نوسان و پاسخ گذرای سیستم کاملاً مشهود است.



شکل ۱۰. پاسخ زمانی مود سوم در سه k_j مختلف.

۴ - نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش تحلیل ارتعاشات آزاد یک مجموعه سلول فتوولتائیک نصب شده بر روی پایه ردیاب دو محوره بوده است. بدین منظور یک مدل سه درجه آزادی از مجموعه ارائه شده است و به کمک روش لاگرانژ معادلات حرکت آن استخراج و بصورت عددی حل شده است. اثرات پارامترهای مختلف سیستم نظیر زاویه پنل‌ها و خصوصیات ردیاب بر رفتار ارتعاشی پنل‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند افزایش زاویه θ علاوه بر اثراتی که بر میرایی و دامنه نوسانات می‌گذارد، محدوده فرکانس‌های ارتعاشی را در تمامی مودها کاهش می‌دهد. همچنین افزایش سفتی جک تنظیم کننده زاویه پنل‌ها تاثیر قابل توجهی بر رفتار ارتعاشی پنل‌ها دارد.

مراجع

1. T. W. Patzek, G. D. Croft, "A global coal production forecast with multi-Hubbert cycle analysis", *Energy* 35, 3109–3122 (2010).
2. M. Koussa, A. Cheknane, S. Hadji, M. Haddadi, S. Noureddine, "Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions", *Applied Energy* 88, 1756–1771 (2011).
3. A. Barker, M. Neber, H. Lee, "Design of a low-profile two-axis solar tracker", *Solar Energy* 97, 569–576 (2013).
4. C. A. Tirmikci, C. Yavuz, "Comparison of Solar Trackers and Application of a Sensor Less Dual Axis Solar Tracker", *Journal of Energy and Power Engineering* 9, 556–561 (2015).
5. H. Fathabadi, "Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators", *Renewable Energy* 95, 485–494 (2016).
6. A. El Hammoumi, S. Motahhir, A. El Ghzizal, A. Chalh, A. Derouich, "A simple and low-cost active dual-axis solar tracker", *Energy Science & Engineering* 6, 607–620 (2018).
7. A. B. Pulungan, S. Lovely Son, S. Huda, U. Ubaidillah, "IMPROVEMENT OF A SOLAR PANEL TRACKING SYSTEM USING ADDITIONAL MASS POSITION ADJUSTMENT", *International Journal of GEOMATE* 21, 92–99 (2021).
8. A. B. Pulungan, S. Lovely Son, S. Huda, U. Ubaidillah, "Semi Active Control of Solar Tracker Using Variable Position of Added Mass Control", *Proceedings of 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, Padang, Indonesia, July 22-24 (2019).