تحلیل تجربی ارتعاشات ناشی از جریان محوری سیال حول میله سوخت مجازی تحت قید الاستیک

INC29-1269

رضا امیریان[۱]، منصور طالبی[۲]*، نظام‌علی بختیاری[۱]
۱.شرکت سوخت رآکتورهای هسته‌ای، اصفهان-ایران
۲.پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران-ایران

چکیده:
در طول عمر میله‌های سوخت در رآکتورهای قدرت هسته‌ای سایش ناشی از ارتعاش میله‌ها در محل تماس با نگهدارنده‌ها موجب تخریب میله‌ها می‌گردد. در این پژوهش تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان سیال محوری تک میله سوخت مجازی مربوط به یک مجتمع سوخت خاص با در نظر گرفتن اثر نگهدارنده‌های میله به‌منظور دستیابی به یک مرجع مبنا جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی انجام گردید. همچنین در این مطالعه از چند حسگر لیزری سنکرون شده برای اندازه‌گیری هم‌زمان ارتعاش چند نقطه از میله و نیز از دو حسگر در هر مقطع برای اندازه‌گیری برآیند جابجایی میله در آن نقطه بهره گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که متوسط دامنه ارتعاش میله سوخت حدود ۲ میکرومتر و فرکانس اصلی نوسان آن ۱۲۱ هرتز است.

کلیدواژه‌ها: تست ارتعاش ناشی از جریان سیال، میله سوخت، نگهدارنده‌های الاستیک، حسگرهای لیزری.

Experimental analysis of axial flow induced vibrations around the dummy fuel rod under elastic support

R. Amirian[1], M. Talebi[2] and N.A. Bakhtiari[1]
1. Nuclear Reactors Fuel Company (NRF Co.), P.O.BOX: 81465-1957., Isfahan, Iran.
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 8146-1957, Tehran, Iran

Abstract:
During the lifetime of the fuel rods in nuclear power reactors, the wear caused by the vibration of the rods in the place of contact with the spacers causes leakage of the rods. In this research, laboratory tests of measuring axial flow induced vibration of a single dummy fuel rod related to specified fuel assembly, taking into account the effect of the rod supports, were conducted to obtain benchmark for comparison with the numerical simulation results. Also, in this study, several synchronized laser sensors were used simultaneously to measure the vibration of several points of the rod and two sensors in each section to measure the displacement of the rod at that point. The results of the tests showed that the vibration amplitude of the fuel rod is 2 micron and its fundamental frequency is 121 Hz.

Keywords: Flow induced vibration, Fuel rod, Spacer grid, Laser sensor.

۱. مقدمه

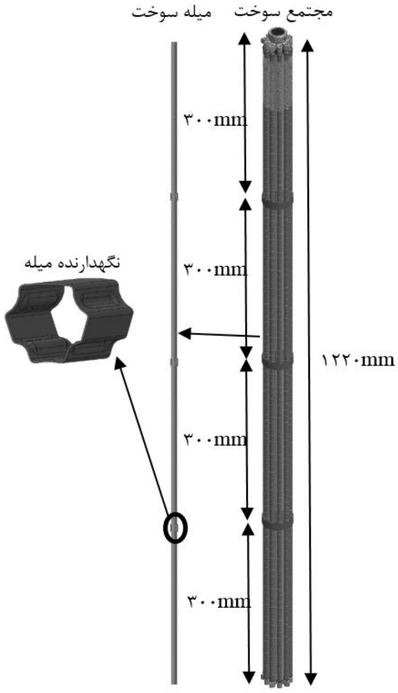
مجتمع سوخت هسته‌ای شامل اجزاء بسیاری است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به میله‌های سوخت و شبکه‌های نگهدارنده اشاره کرد. میله‌ها به وسیله شبکه‌های نگهدارنده در فواصل مشخص مهار شده‌اند. برای دست یافتن به بالاترین توان خروجی ممکن در یک نیروگاه هسته‌ای، خنک‌کننده باید تا حد امکان گرمای تولید شده را جذب کند. این ویژگی به وسیله سرعت بالا و شدت آشفتگی جریان سیال خنک‌کننده به دست می‌آید. ارتعاش میله‌ها ناشی از جریان سیال و پدیده سایش ناشی از ارتعاش به عنوان مهم‌ترین خسارت ایجاد شده ظاهر می‌شود. بنابراین به‌منظور افزایش توان مجتمع‌ها، تحلیل رفتار ارتعاشی میله ضروری است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در بین سال‌های ۲۰۰۶ الی ۲۰۱۵ حدود ۵۷ درصد از نشتی‌های گزارش شده در رآکتورهای قدرت دنیا به دلیل پدید سایش نوسانی میله و نگهدارنده بوده است[۱]. به عنوان یک اصل اساسی در طراحی اجزائی که تحت بار دینامیکی قرار دارند، فرکانس تحریک باید به مقدار کافی از محدوده فرکانس‌های طبیعی میله فاصله داشته باشد تا دچار افزایش دامنه نوسان و در نهایت با گذشت زمان تخریب نشود[۲ و ۳].

پدیده ارتعاش ناشی از جریان در میله‌های سوخت به صورت آزمایشگاهی در تجهیزات تست خارج از رآکتور مطالعه شده است. پیبرنس[۴] یک برنامه آزمایشگاهی برای ارزیابی افت فشار میله‌های سوخت با اندازه واقعی و زاویه و سرعت برخورد متغیر بین جریان و میله‌های سوخت در مقایسه با یک جریان تک جهته در نظر گرفت. همچنین گبیلت و والری[۵] برای به دست آوردن طیف نیروی تحریک بر روی مجتمع‌های سوخت با ابعاد واقعی یک برنامه مطالعاتی و تحقیقاتی پیشنهاد کردند. قسمت آزمایشگاهی این برنامه در تجهیز تست گریلون فروید و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و جریان محوری، عرضی و ترکیبی صورت گرفت. پارامترهای مودال مجتمع سوخت با استفاده از روش تحلیل سیگنال تحت تحریک جریان محوری، عرضی و ترکیبی با نرخ‌های جریان مختلف به دست آمد. گیسلی و همکاران[۶] برنامه‌ای جامع برای تایید مجتمع سوخت توسعه دادند. این تحقیق تجربه به دست آمده در استفاده از یک تجهیز هیدرولیکی دما و فشار پایین را بیان می‌کند. کانگ و همکاران[۷] تست ارتعاشی ناشی از جریان را بر روی یک مجتمع سوخت با ابعاد کوچک‌تر به‌منظور بررسی اثر متقابل جریان سیال بر روی سازه انجام دادند. وو و همکاران[۸] یک مدل میله سوخت با شرایط تکیه‌گاهی الاستیک بدون نگهدارنده‌های میانی در نظر گرفتند. سپس مدل آزمایشگاهی شامل چهار میله سوخت را با نتایج حاصل از مدل ریاضی مقایسه کردند. زمان و لاواک[۹،۱۰] ابتدا مدل ریاضی جهت تحلیل مودال مجتمع‌های سوخت VVER-1000 را استخراج و نتایج حاصل را با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی صحه‌گذاری کردند.

مرور پژوهش‌های صورت گرفته‌ی در دسترس در زمینه تست‌های آزمایشگاهی ارتعاش ناشی از جریان سیال میله سوخت نشان داد که این آزمایشات یا بر روی یک مجتمع سوخت یا تک میله سوخت بدون نگهدارنده‌های میانی انجام شده است. پژوهش قبلی نویسندگان[۱۱] این مقاله نشان داد که این نگهدارنده‌ها تأثیر بسزایی بر رفتار ارتعاشی میله دارند. در این پژوهش ارتعاش ناشی از جریان یک میله سوخت مجازی مربوط به یک مجتمع سوخت خاص به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر تحت قید نگهدارنده‌های الاستیک تحقیق شده است. به این منظور یک سامانه تست و اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان سیال طراحی، ساخته و راه‌اندازی گردیده است. در این پژوهش تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان سیال محوری تک میله سوخت مجازی به‌منظور دستیابی به یک مرجع نمونه (بنچمارک) جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی ارتعاشات ناشی از جریان انجام شده است. همچنین برخلاف آزمایشات انجام شده تاکنون که از یک حسگر برای اندازه‌گیری ارتعاش استفاده شده، در این پژوهش از مجموعه حسگرهای سنکرون شده برای اندازه‌گیری همزمان ارتعاش چند نقطه از میله و در هر مقطع از دو حسگر برای اندازه‌گیری برآیند جابجایی میله در آن نقطه بهره گرفته شده است.

۲. تعریف مسئله

با توجه به اینکه هدف نهایی این پروژه به دست آوردن ارتعاشات تک میله سوخت موردمطالعه و در آینده مقایسه با نتایج شبیه‌سازی ارتعاشات آن است، تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری ارتعاش ناشی از جریان محوری میله در یک کانال با قطر هیدرولیکی معادل میله در کانال مجتمع سوخت انجام شده است. جنس و ابعاد میله سوخت موردمطالعه با میله سوخت اصلی یکسان و تنها تفاوت آن قرص‌های سربی است که به جای قرص‌های اورانیومی با چگالی و ابعاد یکسان مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱ مجتمع سوخت موردمطالعه شامل میله‌های سوخت و شبکه‌های نگهدارنده را نشان می‌دهد. ابعاد میله سوخت و مشخصات کانال و جریان سیال در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱. میله سوخت موردمطالعه

جدول ۱. ابعاد میله، کانال و شرایط تست

ابعاد میله (mm)	مقدار	مشخصات کانال (mm)	مقدار	شرایط جریان	مقدار
طول	۱۲۰۰	جنس	شیشه	دما (°C)	**۲۵**
قطر	۹،۱	قطر داخلی	۱۶	فشار (bar)	**۵**
ضخامت	۰،۶۵	قطر خارجی	۲۲	دبی (m^3/h)	**۲،۵**

۳. سامانه تست آزمایشگاهی

سیستم طراحی و ساخته شده جهت اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان در کانال تست شامل سه بخش اصلی حسگرهای جابجایی‌سنج غیرتماسی، کارت پردازش سریع داده‌ها و نرم‌افزار تحلیل داده‌ها است. حسگر غیرتماسی مورد استفاده از نوع لیزری مثلثی است. همان‌طور که بیان شد در آزمایشات محققان پیشین از یک حسگر برای اندازه‌گیری ارتعاش میله یا مجتمع استفاده شده است. در این پژوهش از مجموعه حسگرهای سنکرون شده برای اندازه‌گیری هم‌زمان ارتعاش چند نقطه از میله بهره گرفته شده است. در این پژوهش از ۸ حسگر و در هر مقطع از دو حسگر برای اندازه‌گیری برآیند جابجایی میله در آن نقطه به کار گرفته شده است.

به‌منظور حذف سایر تحریک‌های محیطی مؤثر بر ارتعاش میله مانند ارتعاش کانال تست و سازه نگهدارنده، سازه کانال تست به سازه حسگرها متصل شده تا تنها ارتعاش ناشی از جریان سیال اندازه‌گیری شود. شکل۲ کانال تست به همراه مجموعه حسگرها و سازه نگهدارنده را نشان می‌دهد.

شکل۲. نمایی از کانال تست به همراه مجموعه حسگرها و سازه نگهدارنده

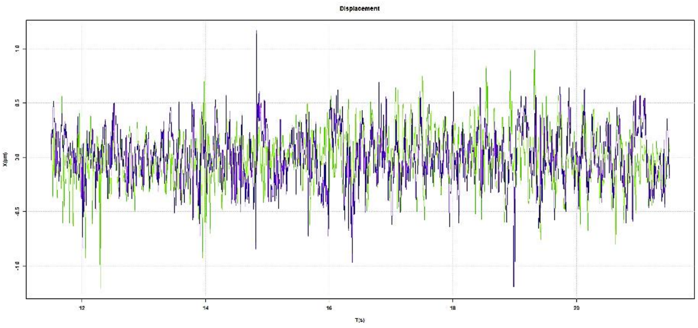
۴. نتایج تست ارتعاشات ناشی از جریان و تحلیل آن

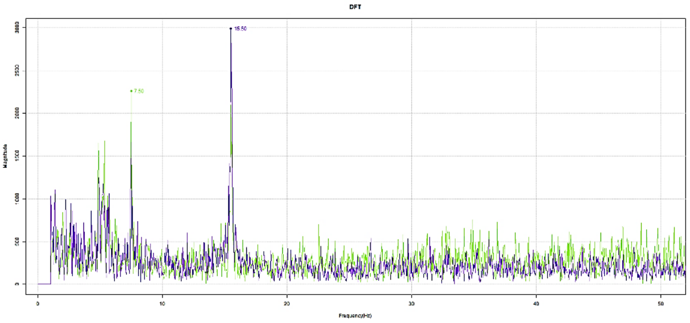
نحوه مهار میله سوخت مجازی درون کانال مشابه مهار میله درون مجتمع سوخت به‌گونه‌ای است که قسمت‌های انتهایی کاملاً ثابت و قسمت‌های میانی نیز با نگهدارنده‌های الاستیک به بدنه متصل شده‌اند. سپس سازه نگهدارنده حسگرها نسبت به کانال تست تنظیم و در نهایت به کانال تست متصل گردیده است.

در ابتدا به‌منظور اطمینان از حذف عوامل تحریک ناخواسته تست ارتعاش در حالت بدون جریان سیال انجام شده تا میزان دامنه نوسان میله در حالت پس‌زمینه به دست آید. سپس به‌منظور بررسی میزان تأثیر نگهدارنده‌ها بر دامنه ارتعاش میله تست اندازه‌گیری ارتعاش در دو حالت با و بدون نگهدارنده انجام شده است.

۴. ۱ تست ارتعاش پس‌زمینه

نتایج تست در حالت بدون جریان سیال در شکل۳ آمده است. متوسط دامنه جابجای میله بدون جریان سیال (پس‌زمینه) حدود ۰,۲۵ میکرومتر و همچنین از نمودار شدت فرکانسی فرکانس طبیعی سازه حسگرها ۵ هرتز، سازه کانال تست ۱۵ هرتز به دست می‌آید.

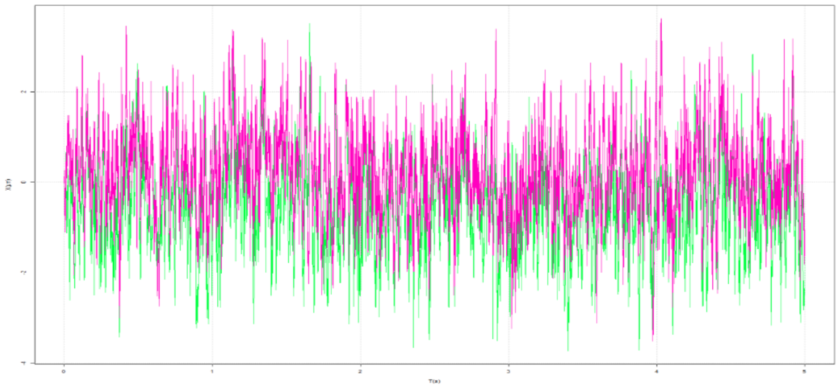




شکل ۳. تست ارتعاش میله در پس‌زمینه (بدون جریان سیال)

۴. ۲ تست میله سوخت با نگهدارنده میانی

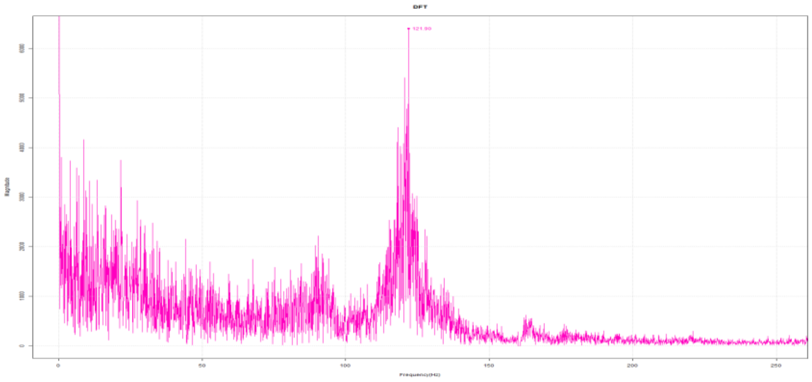
در ابتدا جریان سیال برقرار و شرایط پایدار سیال بر اساس جدول ۱ اعمال گردیده است. تست برای رسیدن به تکرارپذیری مناسب ۶ با تکرار شده است. شکل۴ جابجایی نقطه میانی میله سوخت نسبت به زمان را در یکی از تست‌ها نشان می‌دهد. مقدار متوسط دامنه نوسان ۲ میکرومتر به دست می‌آید که با نتایج تست آنالیز مودال مربوط به پژوهش نویسندگان حاضر[۱۱] مطابقت دارد.



شکل ۴. جابجایی نقطه میانی میله سوخت با نگهدارنده نسبت به زمان

۴. ۳ تحلیل فرکانسی میله سوخت

شکل۵ طیف فرکانس تحریک میله توسط سیال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین شدت نوسان میله در بازه فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز است. همچنین اولین فرکانس طبیعی میله ۱۲۱ هرتز است که با نتایج تست آنالیز مودال مربوط به پژوهش نویسندگان حاضر[۱۱] مطابقت دارد.



شکل ۵. طیف فرکانس تحریک میله سوخت توسط سیال

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتعاش ناشی از جریان یک میله سوخت خاص تحت قید نگهدارنده‌های الاستیک تست و بررسی شد. به این منظور یک سامانه تست و اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان سیال طراحی، ساخته و راه‌اندازی شد. با استفاده از این سامانه تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری ارتعاشات ناشی از جریان سیال محوری تک میله سوخت با در نظر گرفتن اثر نگهدارنده‌های میله انجام شد. همچنین در این پژوهش از چند حسگر سنکرون شده برای اندازه‌گیری هم‌زمان ارتعاش چند نقطه از میله و نیز از دو حسگر در هر مقطع برای اندازه‌گیری برآیند جابجایی میله در آن نقطه بهره گرفته شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- متوسط دامنه ارتعاش میله سوخت به مقدار ۲ میکرون و فرکانس اصلی آن ۱۲۱ هرتز اندازه‌گیری شده است.
- بیشترین شدت نوسان میله سوخت در بازه فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز است.

۶. مراجع

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors*, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.5, IAEA, Vienna (2019).
2. Kim, K.T., 2010. "The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod fretting wear". *Nuclear Engineering and Design*, 240, pp. 1386–1391.
3. Paidoussis, M.P., 1983. "Review of Flow-Induced Vibrations in Reactors and Reactor Components". *Nuclear Engineering and Design.*
4. Païdoussis, M. P., *Dynamics of flexible slender cylinders in axial flow—part 2: experiments*, Journal of Fluid Mechanics, 1966, 26(4): p. 737–751.
5. Gobillot, G. and Vallory, J., *Determination of turbulent excitation spectra superposition's rules in various cases of 2D mixed flow redistribution in PWR fuel assemblies*. IAEA-TECDOC-1454, 2005, p. 69-73.
6. Martin Ghiselli, A., et al., *CARA fuel assembly development*. IAEA-TECDOC-1454, 2005, p. 33-49.
7. Kang, H.S., et al., *The flow-induced vibration (FIV) test using a partial fuel assembly*. 2006.
8. Wu, L., Lu, D.G. and Liu, Y., *Experimental Investigation on Flow-Induced Vibration of Fuel Rods in Supercritical Water Loop*, Science and Technology of Nuclear Installations, 2014.
9. Zeman, V. and Hlavac, Z., *Dynamic response of VVER 1000 type reactor excited by pressure pulsations*. Eng. Mech., 2008, 15(6): p. 435–446.
10. Zeman, V. and Hlavac, Z., *Modelling and modal properties of the nuclear fuel assembly*, Applied and Computational Mechanics, 2011, 5(2): p. 253–266.
11. Amirian, R., Talebi, M., & Zarepoor, Gh. R., (2022). Numerical Model Development of Dummy Fuel Rod under New Spacer Grids and End Constraints Using Experimental Modal Analysis. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, (In Persian).