J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 46, pp. 59-64, 2009

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۴۶، صفحات ۶۴-۵۹، ۱۳۸۷

Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

محاسبه و تعیین فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر به وسیله نرم‌افزار ANSYS®10.0

یوسف صدیق*، سیدابوالفضل عظیم‌فر
مدیریت سوخت، شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۷۴۸۴-۱۹۳۹۵، تهران ـ ایران

چکیده: حمل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر توسط محفظه‌های ویژه‌ای انجام می‌گیرد. این محفظه‌ها نسبت به هر گونه ارتعاش و ضربه مقاوم بوده و در مراحل مختلف حمل مانع از آسیب‌دیدگی سوخت می‌گردند. انجام تحلیل‌های دینامیکی محفظه حمل، تحت تأثیر نیروهای دینامیکی وارد بر آن مستلزم تحلیل‌های ارتعاشی محفظه است. نتیجه این تحلیل‌ها منجر به مشخص شدن مُدهای ارتعاشی و مقادیر فرکانس‌های طبیعی این محفظه خواهد شد. این محفظه‌ها بایستی به گونه‌ای طراحی گردند تا حد ممکن از محدوده فرکانس تشدیدشان دور باشند، نوسانات در محدوده فرکانس طبیعی هر سازه، موجب افزایش دامنه نوسانی آن سازه شده و خطر از هم پاشیدگی آنرا بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. تحلیل‌های ارتعاشاتی به منظور تعیین مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها و شکل مُدهای آنها در فرکانس‌های مزبور انجام می‌گیرند. مقدار فرکانس طبیعی هر سازه بستگی به شکل، جنس و تکیه‌گاههای آن سازه دارد. از طرف دیگر مقدار بار وارده و نوع آن نیز می‌تواند در مقدار فرکانس طبیعی مؤثر باشد. در این تحقیق محفظه حمل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر توسط نرم‌افزار ANSYS®10.0 شبیه‌سازی شده و ده مُد ارتعاشاتی به همراه فرکانس‌های طبیعی این محفظه‌ها محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: ***فرکانس طبیعی، فرکانس تشدید، مُدهای ارتعاشاتی، محفظه حمل و نقل سوخت تازه، رآکتور VVER-1000***

Calculation and Determination of Natural Frequencies for Fresh Fuel Transportation Package Set with ANSYS®10.0 Software

Y. Sedigh*, S.A. Azimfar
Fuel Management, Nuclear Power Production and Development Co, AEOI, P.O. Box: 19395-7484, Tehran – Iran

Abstract: The fresh fuel for BNPP-1 is due to be transported inside special containers which are supposed to be designed to stand against vibrations and impacts in order to protect the fuel from any possible damage. In order to perform the structural dynamic analysis of the containers, while being subjected to impact of dynamic forces, it is necessary to perform the vibration analysis which will lead to the vibrational modes and their natural frequencies for the structure of the containers. The vibration opposition of the containers must be far beyond the critical resonance. The resonance frequencies about the natural frequency of the structure will cause the enhancement of the oscillation range and may be ended with its disintegration. Determination of the natural frequencies and their mode shapes can be achieved by vibration-analyzing-methods. The amount of the natural frequency of any structure depends strongly on its shape, material and its lean points, as well as the amount and the type of the loads which the structure will be subjected to. In the presente research, the container of the fresh fuel of BNPP-1 is simulated by ANSYS®10.0 and their ten natural frequency modes have been calculated.

Keywords: ***Natural Frequency, Critical Resonance, Vibration Modes, Transportation Package Set, Fresh Fuel, VVER-1000 Reactor***

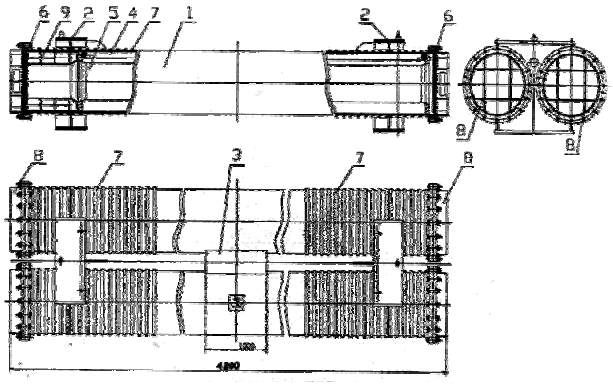
*email: t_seddigh@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۱۰/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۶/۵/۲۹

۱- مقدمه

محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر یک نمونه پیشرفته از این نوع محفظه‌ها می‌باشد که بر مبنای الزامات مربوط به قوانین ایمنی حفاظت فیزیکی ویژه حمل و نقل مواد رادیوآکتیو (OPBZ-83) و قوانین مربوط به ایمنی حمل و نقل مواد رادیوآکتیو (قوانین IAEA، 85/90) طراحی شده است. این محفظه محصول جدیدی است که بر مبنای قوانین و الزامات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای حمل و نقل هوایی سوخت و مواد هسته‌ای طراحی شده است. نمایی از این محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است [۱ و ۲].

بدنه محفظه از دو لوله فولادی به قطر ۴۲۷ میلی‌متر ساخته شده است. دو سر این لوله‌ها به یکدیگر جوش داده شده‌اند. لوله‌ها بوسیله دو نگهدارنده و جعبه اتصال به یکدیگر متصل می‌شوند. جعبه اتصال از ورق فولادی به ضخامت ۵، طول ۱۰۰۰ و عرض ۱۶۵ میلی‌متر ساخته شده است. هر نگهدارنده[1] شامل دو صفحه بالایی و پایینی بصورت دو قلاب تسمه‌ای شکل می‌باشد. تعدادی پین روی صفحه بالایی و یکسری سوراخ نیز روی صفحه پایینی تعبیه شده است. از این پین‌ها و سوراخ‌ها برای فاصله‌بندی مناسب محفظه‌ها به هنگام حمل و نقل و ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. از سوراخ‌های موجود روی دو قلاب تسمه‌ای، برای بلند کردن و جابجایی محفظه‌های حمل و نقل سوخت اولیه استفاده می‌شود. یکسری پوشش (آستری) روی بدنه خارجی هر لوله محفظه حمل و نقل سوخت اولیه، برای حفاظت از مجتمع‌های سوخت تعبیه شده است. پوشش (آستری) خارجی، استوانه‌ای به قطر ۴۰۰ میلی‌متر بوده و آستری داخلی آن بصورت



1- Body (Case) 2- Support 3- Box Connection
4- Lining 5- Fuel Assemblies 6- Lid (Cover)
7-Band 8- Damper 9- Insert

شکل ۱- نمایی از محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر (VVER-1000).

شش‌وجهی است که طول هر ضلع آن ۲۴۸ میلی‌متر می‌باشد. هر آستری شامل شش قطعه چوبی است که به وسیلهٔ یکسری پیچ به یکدیگر محکم متصل شده‌اند. قسمت داخلی آستری با روکش‌های پارچه‌ای پوشیده شده است. لوله‌های محفظه حمل و نقل سوخت اولیه با کلاهک‌ها (درپوش‌ها) و واشرهایی محکم آب‌بندی می‌شوند. کلاهک‌ها و بدنه با ۱۶ پیچ M20 به یکدیگر متصل می‌شوند. کلاهک دیسکی شکل دارای قطر خارجی ۵۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۸ میلی‌متر است. برای حفاظت سطوح خارجی مجتمع سوخت در برابر آسیب‌های ناشی از خوردگی، مجتمع سوخت به وسیله پارچه کرباسی کلفت و پلی‌اتیلن بسته‌بندی می‌شود [۳ و ۴].

۲- مشخصات محفظه حمل و نقل سوخت تازه

بدنه و درپوش (کلاهک) محفظه حمل و نقل جدید سوخت نیروگاه اتمی بوشهر، برای انجام دادن موفقیت‌آمیز تست‌های ضربه در سرعت‌های کمتر از ۹۰m/sec تقویت شده است. در جدول ۱ مشخصات کلی مربوط به محفظه حمل و نقل جدید سوخت آورده شده است [۳]. شرایط عادی[2] بکارگیری و استفاده از این نوع محفظه‌ها عبارتند از:

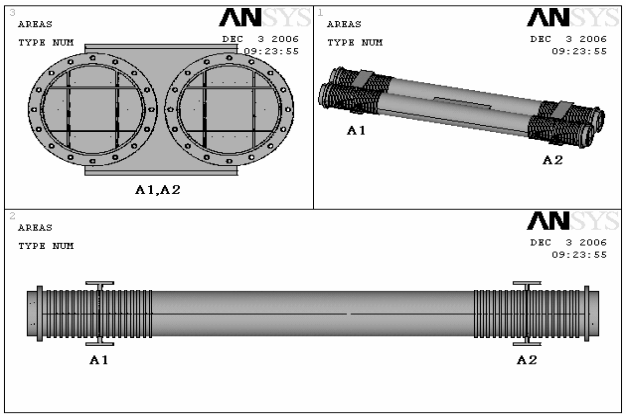
- درجه حرارت بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد
- حداکثر رطوبت نسبی هوا ۱۰۰٪ [۵].

۳- مدلسازی محفظه حمل و نقل سوخت تازه

مدل سه بعدی (3-D) محفظه حمل و نقل سوخت تازه، در محیط گرافیکی (GUI) نرم‌افزار ANSYS®10.0 بر اساس اطلاعات موجود در منابع و مآخذ معتبر تهیه شده است [۳] (شکل ۲).

جدول ۱- مشخصات کلی مربوط به محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر.

ردیف	مشخصه	مقادیر	ملاحظات
۱	ابعاد خارجی محفظه حمل و نقل سوخت تازه	۶۶۰×۱۰۷۰×۴۸۰۰ میلی‌متر	
۲	تعداد مجتمع های سوخت قابل حمل	۲ عدد	
۳	وزن محفظه حمل و نقل سوخت تازه	۱۹۵۰ کیلوگرم	
۴	وزن مجتمع های سوخت بارگیری شده در محفظه	۲۰۰۰ کیلوگرم	
۵	عمر مفید محفظه حمل و نقل سوخت تازه	۲۰ سال	



شکل ۲- مدل سه بعدی (3-D) محفظه حمل و نقل سوخت تازه، در محیط نرم‌افزار ANSYS®10.0.

۴- مدل سه‌بعدی مربوط به سازه محفظه حمل و نقل سوخت تازه

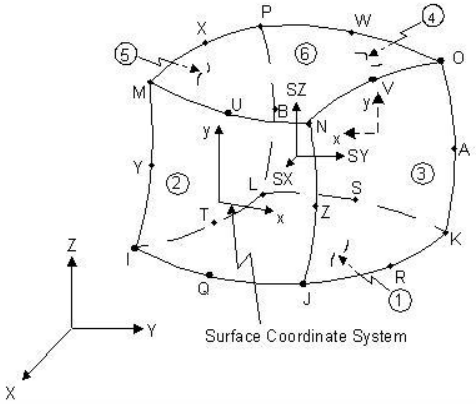
مدلی که برای تحلیل ارتعاشاتی مذکور در نرم‌افزار ANSYS®10.0 استفاده شده، مدل سه‌بعدی SOLID95 بوده است که برای تحلیل‌های سازه‌ای و ارتعاشاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل خیلی شبیه مدل SOLID45 (۸ گره (Node)) بوده و دارای ۲۰ گره که هر گره دارای سه درجه آزادی در جهت‌های x, y, z می‌باشد. از این مدل در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی در محدوده الاستیک و پلاستیک، مودال، خزش، تغییر شکل‌های بزرگ و کرنش‌های نسبتاً بالا و دیگر تحلیل‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل و ابعاد مدل و محل قرار گرفتن گره‌ها در آن مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به انتخاب نوع تحلیل مودال (ارتعاشاتی) و انتخاب نوع مدل مناسب (SOLID95)، مدل محفظه حمل و نقل سوخت تازه مش‌بندی شده که در شکل ۴ مدل مش‌بندی شده آن نشان داده شده است [۶].

۵- روش‌های حل در آنالیز مودال (ارتعاشاتی)

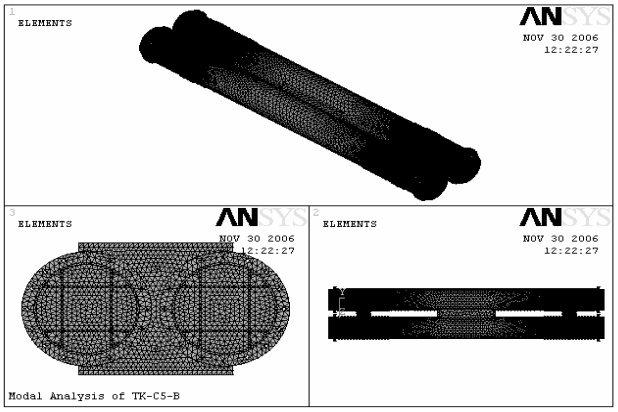
جهت استخراج و محاسبه مُدها و مقادیر ویژه، روش‌های عددی متنوعی این نرم‌افزار در اختیار قرار می‌دهد که از آنها تحت عنوان Eigen Solver نام برده می‌شود. هر یک از این روش‌ها از لحاظ کاربری، همچون اشغال حافظه حقیقی یا مجازی جهت تحلیل، دقت محاسبات، مقدار حجم مدل و تعداد فرکانس‌های درخواستی از حل‌کننده، دارای نقاط قوت و ضعف نسبت به یکدیگر می‌باشند. روش‌هایی که برای آنالیز مودال در نرم‌افزار ANSYS®10.0 استفاده می‌شود عبارتند از:

- روش Block Lanczos
- روش Subspace Method
- روش Power Dynamics Method
- روش Reduced Method (House Holder)
- روش Unsymmetrical Method
- روش Damped Method
- روش QR Damped Method

روش Block Lanczos که برای مسائل مقادیر ویژه بزرگ متقارن مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرخ همگرایی سریعتری نسبت به روش Subspace دارد. در این روش از حل‌گر Sparse استفاده می‌شود و برای مدل‌های ترکیبی المان‌های Shell و Solid که شبکه‌بندی مناسبی در آنها صورت نگرفته است مناسب است. نیاز به فضای حافظه متوسط و حجم دیسک سخت آن پایین می‌باشد. در این تحلیل، از این روش برای آنالیز مودال محفظه حمل و نقل سوخت تازه استفاده شده است [۶].



شکل ۳- شکل و ابعاد المان سه‌بعدی SOLID95 در نرم‌افزار ANSYS®10.0.



شکل ۴- مدل سه‌بعدی (3-D) مش‌بندی شده محفظه حمل و نقل سوخت تازه، در محیط نرم‌افزار ANSYS®10.0.

۶- خواص مواد (Material Properties)

اجزاء محفظه حمل و نقل سوخت تازه از جنس فولاد می‌باشد. در تحلیل‌هایی که در میدان سازه‌ای انجام می‌گیرد مشخصات مواد در میدان مذکور بعنوان ورودی به نرم‌افزار ANSYS®10.0 داده می‌شود، لیست مواد به همراه خواص تشکیل‌دهنده محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر که برای انجام تحلیل در میدان سازه‌ای از آنها استفاده می‌گردد در جدول ۲ آورده شده است [۳].

۷- تعیین ثابت‌های حقیقی (Real Constants)

ثابت‌های حقیقی که در این تحلیل مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند عبارتند از:

شرایط محیطی از جمله درجه حرارت محیط و محفظه، شتاب ثقل، فشار اتمسفر برابر با 760 mmHg (103.3 Kpa) و سایر موارد مورد نیاز تحلیل‌های مودال [۵ و ۶].

۸- تعیین شرایط مرزی و اولیه (Define Boundary Conditions)

در تحلیل ارتعاشاتی انجام گرفته، از روش تنش آزاد استفاده شده است و بر طبق شکل ۲ کلیه گره‌ها و المان‌های روی سطوح A1,A2 مدل محفظه حمل و نقل سوخت تازه، در هر سه جهت (X, Y, Z) ثابت فرض می‌شود. پارامتر وزن نیز در این تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۹- تحلیل، مشاهده و تفسیر نتایج

با توجه به تهیه مدل و تشریح الزامات مورد نیاز تحلیل ارتعاشاتی محفظه حمل و نقل سوخت تازه، توسط نرم‌افزار ANSYS®10.0 در این قسمت نمونه‌هایی از نتایج این تحلیل بر روی مدل مذکور را با توضیحاتی بیان کرده‌ایم. ده مورد اولیه فرکانس طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه در جدول ۳ مندرج است. جهت تحلیل دینامیکی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر در برابر نیروهای خارجی وارد بر آن در طی حوادث مختلف بر طبق دستورالعمل‌های حمل سوخت تازه، شکل مُدهای ارتعاشی و مقادیر فرکانس‌های طبیعی محفظه باید مشخص باشند و هدف از انجام این تحقیق تعیین فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه می‌باشد تا بتوان امکان بروز پدیده تشدید (رزونانس) را در برابر نیروهای وارد بر آن مشخص کرد. فرکانس تحریک خارجی در طی حوادث مختلف

جدول ۲- خواص مواد تشکیل‌دهنده محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر.

Material	Modulus of Elasticity, E (Gpa)	Poisson's Ratio, μ	Density, ρ (g/cm^3)
Steel 10	210	0.3	7.8
Pine-Wood (Lining)	1.5	0.2	0.5
Steel 3 (Bolts)	210	0.3	7.8

جدول ۳- مقادیر فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه، (نتایج تحلیل مودال).

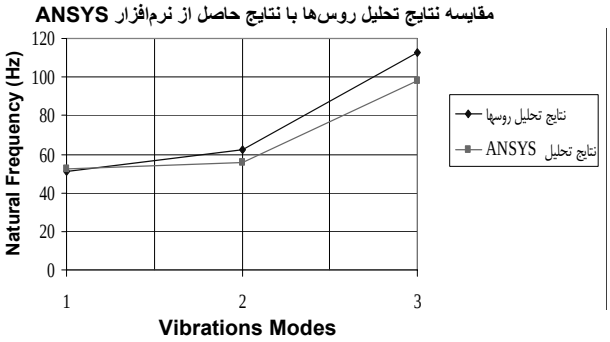
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.083361	1	1	1
2	0.088914	1	2	2
3	0.127830	1	3	3
4	0.156440	1	4	4
5	0.219590	1	5	5
6	0.270330	1	6	6
7	0.277170	1	7	7
8	0.281280	1	8	8
9	0.352360	1	9	9
10	0.364120	1	10	10

بسته به مقدار بار و زمان اعمال آن متغیر می‌باشد، در طراحی محفظه سعی شده است تا حد امکان فرکانس تحریک خارجی از فرکانس طبیعی محفظه دور باشد تا از بروز پدیده تشدید جلوگیری بعمل آید. آنالیز مودال جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر توسط شرکت روسی "JSC,"TVEL در سال ۲۰۰۲ به وسیله برنامه‌های کامپیوتری DANCO و DINAMIKA انجام گرفته است [۳]. در این تحلیل سه مُد ارتعاشاتی بهمراه فرکانس‌های طبیعی مربوط به آنها حساب شده است، که در جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل روس‌ها و نتایج فعلی حاصل از تحلیل ANSYS®10.0 درج شده است.

برای معتبرسازی، نتایج حاصل از تحلیل روس‌ها با نتایج فعلی حاصل از تحلیل ANSYS®10.0 در شکل ۵ مقایسه شده است. با توجه به منحنی شکل ۵، نتایج حاصل از تحلیل ANSYS®10.0، در مقایسه با نتایج تحلیل روس‌ها [۳] در سه مُد اولیه ارتعاشاتی مقادیر فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی محفظه حمل و نقل سوخت تازه، نتایج تحلیل شرکت روسی "JSC,"TVEL با نتایج حاصل از نرم‌افزار ANSYS®10.0.

SET	ANSYS®10.0 Results	JSC,"TVEL" Results	%Accuracy
	Frequency	Frequency	
1	52.35	50.75	-3.15
2	55.83	62	+9.95
3	98.24	113	+13.06



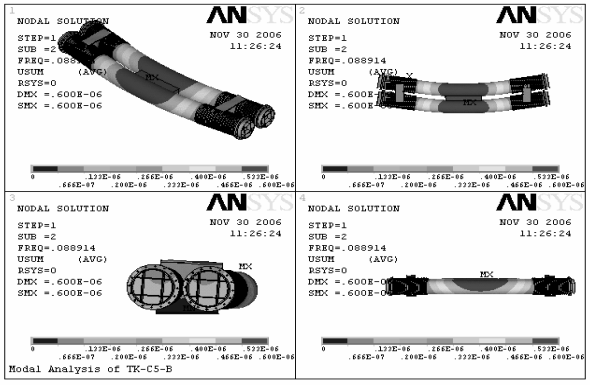
شکل ۵- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل روس‌ها با نتایج حاصل از تحلیل ANSYS.

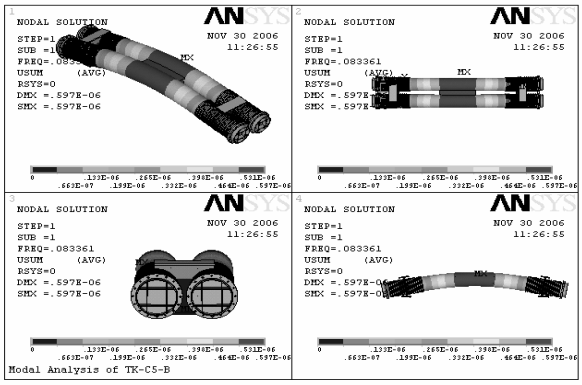
۱۰- نتایج تحلیل مودال

خلاصه‌ای از نتایج تحلیل ارتعاشاتی انجام شده بر روی محفظه حمل و نقل سوخت تازه، در جدول ۵ مندرج است. میزان تغییر مکان کلی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر در مُدهای اول، دوم و سوم ارتعاشاتی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده است. بر اساس این شکل‌ها، در مُد اول ارتعاشاتی بیشترین تغییر مکان کلی در جهت Y و قسمت میانی محفظه بوده همچنین در مُد دوم ارتعاشاتی نیز بیشترین تغییر مکان کلی در جهت Z و قسمت میانی محفظه می‌باشد در نهایت در مُد سوم ارتعاشاتی نیز محفظه در جهت Y دارای دو ماکزیموم می‌باشد که مقادیر آنها در جدول ۵ آمده است.

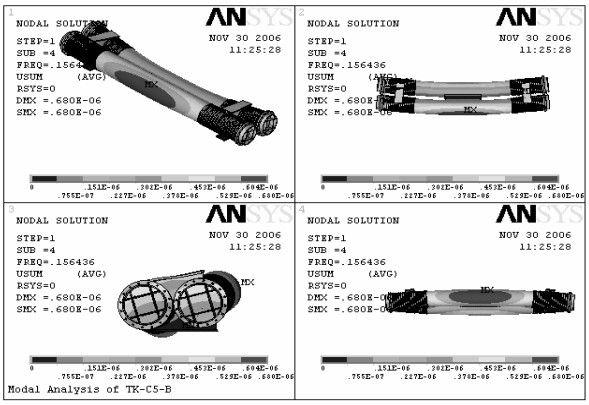
جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل مودال انجام شده بر روی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر.

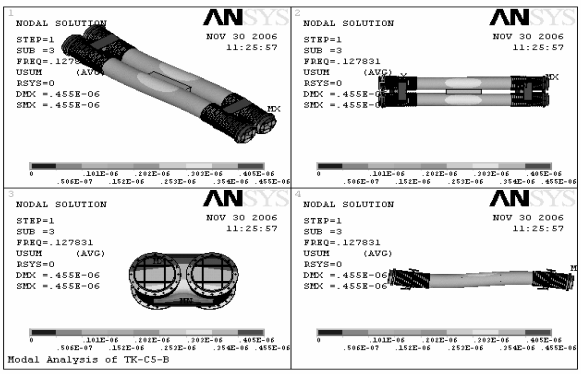
مُد	فرکانس طبیعی	ماکزیموم U_X / مینیموم U_X	ماکزیموم U_Y / مینیموم U_Y	ماکزیموم U_Z / مینیموم U_Z	ماکزیموم U_{sum}
اول	0.083361	0.152E-06	0.597E-06	0.951E-08	0.597E-06
		-0.152E-06	-0.951E-08	-0.262E-06	
دوم	0.088914	0.124E-06	0.106E-06	0.596E-06	0.600E-06
		-0.124E-06	-0.106E-06	-0.214E-06	
سوم	0.127831	0.455E-06	0.177E-06	0.285E-07	0.455E-06
		0.440E-06	-0.177E-06	-0.282E-07	
چهارم	0.156436	0.119E-06	0.663E-06	0.400E-06	0.680E-06
		-0.118E-06	-0.663E-06	-0.570E-06	
پنجم	0.219592	0.193E-06	0.413E-06	0.680E-06	0.728E-06
		-0.193E-06	-0.413E-06	-0.680E-06	





شکل ۶- میزان تغییر مکان کلی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر، در مُد اول و دوم ارتعاشاتی.





شکل ۷- میزان تغییر مکان کلی محفظه حمل و نقل سوخت تازه نیروگاه اتمی بوشهر، در مُد سوم و چهارم ارتعاشاتی.

پی‌نوشت‌ها:

۱- Support

۲- Normal

References:

1. “Radioactive material transport Regulations,” Requirements #ST-1, IAEA, Vienna (1996).
2. “Radioactive material transport Regulations,” corrected in 1990, IAEA, Vienna (1985).
3. User Manual of ANSYS®10.0 Software (2007).
4. “Calculations proving the safety provided by TK-C5-B package set used to Transport VVER-1000 Fuel Assemblies,” JSC. TVEL (2002).
5. “Rules for climbing crane arrangement and safe operation,” 10-382-00 (1985).
6. “General regulations on safety and Physical Protection,” When Transporting Nuclear Materials (OPBZ-83)(1984).