



طراحی و اندازه‌گیری اولین نمونه پنل رادوم ساندویچی باند C ایران برای رادار هواشناسی

مجید مختاری^{1*}، فرید نظری²، مهدی طاهرخانی³، هادی علی اکبریان⁴، سهیل رادیوم⁵

1-دکتری، مهندسی هوافضا، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

2-دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مخابرات، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3-دانشجوی دوره دکترا، مهندسی مخابرات، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4-استادیار، مهندسی مخابرات، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

5-استادیار، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

* تهران، 9761814363، m.mokhtari@sina.kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/11/10

پذیرش: 97/02/02

کلیدواژگان:

رادوم

رادار هواشناسی

ساندویچ پنل

کمانش

افت عبوری امواج

پوشش‌های مخابراتی برای رویارویی با شرایط آب و هوایی سخت و با بیشترین شفافیت الکترومغناطیسی توسعه یافته‌اند. مقابله در برابر بادهای 220 کیلومتر بر ساعت، شرایط دمایی عملکردی 40- تا 60 درجه سانتی‌گراد، رطوبت 90%، تابش امواج فرابنفش و در نهایت افت عبوری امواج الکترومغناطیسی کمتر از 0.3 دسی‌بل و اختلاف افت عبوری برای دو قطبش کمتر از 0.05 دسی‌بل از عمده‌ترین الزامات طراحی مرتبط با رادوم‌های مخابراتی هواشناسی است. در این مقاله طراحی مهندسی و تست‌های تجربی روی اولین نمونه از رادوم ساندویچی برای رادار هواشناسی باند C به همراه تست‌های الکترومغناطیسی و تست کمانش مربوط به پنل‌ها تفصیل شده است. الزامات محیطی با انتخاب مواد اجابت شده‌اند. ارزیابی پایداری مکانیکی با شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس 6.12 و تست کمانش و ارزیابی بهره‌وری الکترومغناطیسی با تست الکترومغناطیسی ارزیابی شده است. نتایج تست کمانش نشان می‌دهد که ساختار ساخته شده می‌تواند تا بار کمانش 190 نیوتن را به‌طور ایمن تحمل کند. مطابق تست‌های الکترومغناطیسی الزامات مربوط به محدودیت‌های افت عبوری یک‌طرفه و اختلاف دو قطبش با احراز مقادیر در محدوده، اجابت شده است و نمونه‌ی طراحی و ساخته شده قابلیت استفاده برای نمونه‌های اولیه را دارد.

Design and measurement of the first Iranian sandwich Radome panel for C – band weather radar application

Majid Mokhtari^{1*}, Farid Nazari², Mehdi Taherkhani², Hadi Aliakbarian², Soheil Radiom¹

1-Department of Mechanical Engineering,, ISRC, Space research center, Tehran, Iran.

2-Department of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 9761814363, Tehran, Iran, m.mokhtari@sina.kntu.ac.ir

Keywords

Radome
Weather radar
Sandwich panel
Buckling
Insertion loss

Abstract

The antenna radomes have been developed to protect antenna systems against harsh environmental conditions, with the most electromagnetic transparency. The wind speed of 220 km/h, -40 to 65 degrees Celsius of temperature deviations, 90 % of relative humidity (RH), protection for UV radiation and finally, one way electromagnetic loss of less than 0.3 dB along with the maximum difference between vertical and horizontal polarizations of 0.05 dB are the main requirements of the weather radar radomes. In this paper, engineering design and experimental studies of some samples of the first sandwich panel radome of C – band weather radar, including manufacturing process, buckling and electromagnetic experimental tests, have been briefly explained. In the material selection process the environmental requirement have been considered. Evaluation of mechanical stability of the radome under wind pressure has been studied in experimental buckle tests and finite element analysis with ABAQUS 6.12. Insertion loss test in anechoic chamber was done to evaluate the transparency of the sandwich panel samples. Buckling tests show that the manufactured sandwich panel can oppose safely with 190 N buckling load. Electromagnetic insertion loss tests of the manufactured panels show that the one way insertion loss and its difference between the vertical and horizontal polarizations, are in the range of the required limitations.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Mokhtari, M., Nazari, F., Taherkhani, M., Aliakbarian, H., Radiom, S., "Design and measurement of the first Iranian sandwich Radome panel for C – band weather radar application", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 234-241, 2019.

1- مقدمه

فرایند طراحی سازه‌های مهندسی در برخی مقاطع در قالب مهندسی معکوس نمونه‌های موجود پیاده سازی می‌شود. در سامانه‌های چند جزئی مانند شبکه رادار هواشناسی یک کشور، که از اجزای واحد پرشماری (رادارهای هواشناسی منطقه‌ای) ساخته شده است، افزودن، تعمیر یا ارتقای زیر مجموعه‌ها بدون انطباق پذیری با دیگر اجزای سامانه جواب عکسی در نتیجه‌ی نهایی خواهد داشت. از این رو بررسی ساختارهای موجود برای تسلط بر ویژگی‌های ساختاری سامانه، اهمیت بالایی در ترمیم، ارتقا و گسترش سامانه‌های موجود دارد.

ساختارهای کامپوزیتی به‌علت پیچیدگی‌های ساختاری ذاتی که دارند، پارامترهای متغیر بیشتری برای طراحی دارند. نوع و طرح الیاف تشکیل دهنده، نوع رزین زمینه، درصد الیاف/ رزین، مشخصات هسته‌ی استفاده شده برای سازه‌های ساندویچی، پرکننده‌ها¹ و افزودنی‌های² استفاده شده در زمینه، پارامترهای وابسته به روش ساخت نمونه (دمای پخت- روش ساخت- درصد حباب- کیفیت ساخت)، روکش‌ها و پوشش‌ها، شرایط کاری نمونه و قیمت تمام شده، از مواردی هستند که به عنوان عمده‌ترین پارامترهای سازه‌ای و فرایندی، هم برای طراحی اولیه سازه و هم مهندسی معکوس ساختارهای کامپوزیتی باید استفاده شود.

با توجه به کاربردی که سازه دارد با روش‌های مختلفی می‌شود به شناسایی بخش‌های مختلف پرداخت. در این مقاله سعی شده است که روش-های متداول و کاربردی در این زمینه ارزیابی و تشریح شود و نتایج مهندسی معکوس ساختار مخابراتی مد نظر به تفاخر نیاز و متناسب با ترتیب مراحل کاری تا روشن شدن نوع ساختار تشریح شود.

پوشش‌های مخابراتی برای محافظت آنتن و تجهیزات مخابراتی در برابر شرایط محیطی سخت استفاده می‌شوند. مقاومت و استحکام بالای آن‌ها در برابر بارگذاری‌های مکانیکی باید همراه با شفافیت این ساختارها در برابر عبور امواج الکترومغناطیسی باشد تا بتواند به عنوان یک ساختار با دوکاربری همزمان استفاده شود [1].

رادارهای مخابراتی مورد استفاده در هواشناسی با رادارهای شناساگر دیگر تفاوت‌های عمده‌ای دارند. رادارهای هواشناسی برای اندازه‌گیری و نه فقط شناسایی پدیده‌های جوی استفاده می‌شوند و عوارضی که در رادارهای دیگر به‌عنوان نویز شناخته می‌شود در این نوع رادارها به عنوان هدف محسوب می‌شوند [1] لذا، با توجه به اهمیت و حساسیت بالاتر در پوشش‌های مخابراتی ساندویچی برای کاربری‌های هواشناسی عمدتاً از ساختارهای فایبرگلاس و هسته‌های فومی استفاده می‌شوند [2-4]. وجود قطرات یا فیلم آب روی پوشش آنتن موجب افزایش افت در امواج الکترومغناطیسی عبوری می‌شود [3]. عمده پوشش‌هایی که برای آب‌گریزی رویه‌های مخابراتی استفاده می‌شود رویه‌های تفلنی، PVF، تدار و استفاده از رنگ‌های آب‌گریز است. مطابق گزارش‌های صورت گرفته استفاده از رویه‌های تفلنی در مواجهه با نور خورشید چسبندگی ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهند. برای پوشش‌هایی که در معرض دماهای بالا قرار دارند استفاده از مواد سرمایی به‌عنوان مهم‌ترین گزینه برای تولید پوشش است [5].

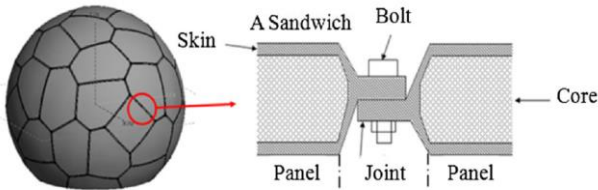


Fig. 1 Weather radar samples and weather radar sandwich panel typical joints [9,10]

شکل 1 نمونه‌هایی از رادوم‌های هواشناسی و اتصالات متداول ساندویچ پنل‌های رادار هواشناسی [9, 10]

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی سازه‌های کامپوزیتی اتصالات آن‌ها است که با توجه به تجربیات پیشین در زمینه اتصالات چسبی و پیچی برای ساختارهای لایه‌ای و ساندویچی [6-8]، در نظر داشتن الزامات اتصالات طی فرایند طراحی لحاظ شده است.

در این مقاله که به‌عنوان اولین پژوهش در زمینه ساخت و تست نمونه پنل رادوم برای باند C (5.6 تا 5.8 گیگاهرتز با کاربری‌های ماهواره‌ای، هواشناسی، راداری و نظامی) در ایران است، فرایند طراحی و تست مکانیکی و میدانی رادوم و پارامترهای موثر در آن بررسی و بهترین انتخاب برای ساخت رادوم پیشنهاد شده است. به‌علت پیچیدگی‌های ساختی و پارامترهای ناخواسته مانند تاثیر فرایند ساخت، نمونه‌های طراحی شده، ساخته و در اتاق آنتن تست الکترومغناطیسی شده است. از آن‌جایی که رادوم در دوره سرویس خود تحت بارگذاری‌های فشاری مانند بار باد قرار دارد، برای بررسی میزان دوام سازه ساخته شده در برابر کماتش ناشی از بار باد، نمونه‌های ساخته شده، مورد تست کماتش قرار گرفته است. نتایج تست کماتش نشان می‌دهد که ساختار ساخته شده می‌تواند تا بار کماتش 190 نیوتن را به‌طور ایمن تحمل کند. افت عبوری کمتر از 0.3 دسی‌بل و اختلاف دو قطبش⁴ کمتر از 0.05 دسی‌بل به‌عنوان نتایج قابل قبولی است که با تست الکترومغناطیسی پنل رادوم گزارش و برای ساخت نهایی پیشنهاد شده است.

2- طراحی الکترومغناطیسی

رادوم‌ها به‌عنوان رویه‌های دی‌الکتریک برای محافظت تجهیزات مخابراتی در مقابل شرایط بد جوی و انتشار امواج الکترومغناطیسی از طریق محفظه با حداقل بازتاب ممکن طراحی می‌شوند. ساختار و نوع رادوم در میزان افت، تغییر فاز و شکست امواج عبوری تاثیر بسزایی دارد [8]. ساختارهای ساندویچی به‌عنوان بهترین ساختارهای سازه‌ای برای رادوم‌ها با ابعاد بزرگ، شناخته می‌شوند. رادوم ساندویچی ساختار نوع A (شکل 2) یکی از انواع

¹ Fillers

² Additives

³ Hydrophobic

⁴ Polarization

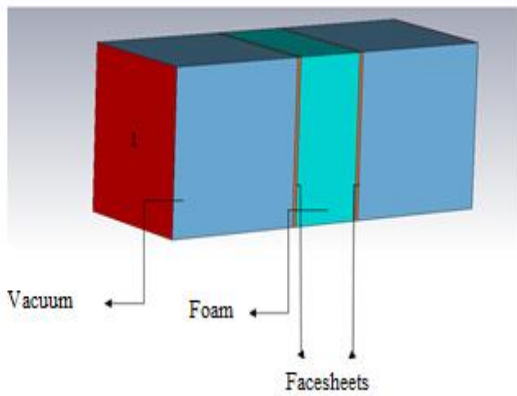


Fig. 3 View of the three-layer simulated blade in CST software

شکل 3 نمایی از تیغه سه لایه شبیه سازی شده در محیط نرم افزار CST

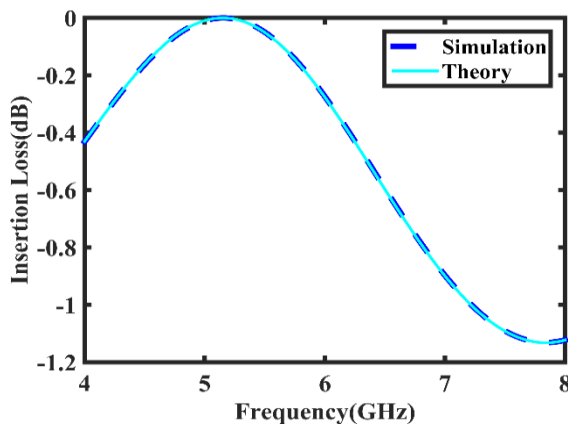


Fig. 4 Insertion loss comparison between simulation results and theory in a three-layer wall

شکل 4 مقایسه افت عبوری برای نتایج شبیه سازی و تئوری در یک تیغه سه لایه بررسی حساسیت پارامترهای طراحی روی پنل ساندویچی رادوم با محدودیت افت عبوری 0.3dB و اختلاف قطبش 0.05dB برای عبور امواج از رادوم ساندویچی در نظر گرفته شده است. در این مقاله، ضخامت، جنس لایه‌های رادوم و تلفات (هسته و رویه‌ها) به عنوان پارامترهای طراحی رادوم بررسی شده است. اثر تغییر ضخامت و تغییر جنس بر جابجایی فرکانس مرکزی، افت عبوری و پهنای باند فرکانسی 0.3dB بررسی شده است.

پنل ساندویچی با ضخامت هسته 15 میلی‌متر، ضخامت رویه‌های 0.8 میلی‌متر (با ضریب دی الکتریک 3 که با استفاده از روش موجبری اندازه گیری شده است) و ضریب دی الکتریک هسته 2.55 [13]، برای طراحی رادوم انتخاب شده است.

بررسی تاثیر تغییر ضخامت هسته برای نمونه‌ای سه لایه، با ضخامت رویه‌های 0.8 میلی‌متر، ضریب دی الکتریک هسته برابر با 2.5 و ضریب دی الکتریک رویه‌ها برابر با 3 مطابق شکل 5 است. مطابق نتایج شبیه سازی‌های انجام شده، با افزایش ضخامت هسته پهنای باند فرکانسی و فرکانس مرکزی کاهش و افت عبوری² افزایش می‌یابد.

بررسی اثر ثابت دی الکتریک هسته بر میزان افت عبوری برای نمونه‌ای سه لایه، با ضخامت هسته 15 میلی‌متر، ضخامت رویه‌های 0.8 میلی‌متر و ضریب دی الکتریک رویه‌ها 3 مطابق شکل 6 است که با تغییر ثابت دی

پر کاربرد و شفاف (از نظر الکترومغناطیسی) هوافضایی و مخبراتی زمینی است. برای بررسی تاثیر اثر رادوم بر آنتن، اغتشاشات سیگنالی مانند افت عبوری اهمیت پیدا می‌کند [9]. افت عبوری مقدار توانی است که یک دستگاه در یک خط انتقال یا فیبر نوری از دست می‌دهد. در طراحی رادوم این افت به مفهوم مقدار سیگنال از دست رفته در اثر عبور از پوشش رادوم است که عموماً بر حسب واحد دسی‌بل بیان می‌شود. افت عبوری¹ بصورت معادله‌ی (1) تعریف می‌شود (شکل 2):

$$IL = -20 \log \left(\left| \frac{E_5}{E_1} \right| \right) \quad (1)$$

با عبور موج از محیط‌هایی با ثابت دی الکتریک‌ها و امپدانس ذاتی‌های مختلف، تنها بخشی از امواج عبور کرده و مابقی منعکس می‌شود (شکل 2). برای یک لایه‌ی دی الکتریک به ضخامت $d_1 - d_2$ و امپدانس ذاتی η_2 بین محیط‌های 1 و 3 (مطابق شکل 2) با ضخامت d_1 و امپدانس ذاتی η_1 میدان کلی در هر محیط، نتیجه بازتاب‌های چند گانه در صفحات مرزی است. با اعمال شرایط مرزی در فصل مشترک‌ها، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر محیط محاسبه شده است. با داشتن میدان‌ها در هر محیط می‌توان نسبت $\tau = \frac{E_4^+}{E_1^+}$ (نسبت میدان الکتریکی عبوری به محیط 5 به میدان الکتریکی تابشی محیط 1) و $\Gamma = \frac{E_2^-}{E_1^+}$ (نسبت میدان الکتریکی برگشتی محیط 1 به میدان الکتریکی تابشی محیط 1) را بدست آورد، که به ترتیب ضریب انتقال و ضریب بازتاب محیط هستند. در تمامی روابط بالا η امپدانس ذاتی محیط می‌باشد که برابر است با ($\mu=1$):

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon}} \quad (2)$$

جهت بررسی حساسیت ساختار رادوم به پارامترهای طراحی و ساختی مختلف، شبیه سازی‌هایی در نرم افزار CST برای یک رادوم سه لایه انجام شده است. مقایسه‌ی بین مدل تئوری و شبیه سازی انجام شده مطابق خوبی را بین نتایج نشان می‌دهد. در شبیه سازی انجام شده یک تیغه دی الکتریک سه لایه مانند شکل 3 با ضخامت محیط‌های 2 و 4، برابر با 0.8 ($d_1 = 0.80$) میلی‌متر و ضخامت محیط 3، 15 میلی‌متر ($d_2 = 15$) در نظر گرفته شده است. ثابت دی الکتریک محیط‌های 1 و 5 برابر ثابت دی الکتریک فضای آزاد (ϵ_0)، ثابت دی الکتریک محیط‌های 2 و 4 برابر $\epsilon_{r1} = 4.2$ و محیط 3 نیز $\epsilon_{r2} = 2.55$ در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج تئوری و شبیه سازی در شکل 4 نشان‌دهنده تطابق خوب بین نتایج تئوری و عددی و در نهایت تایید فرایند مدل سازی است.

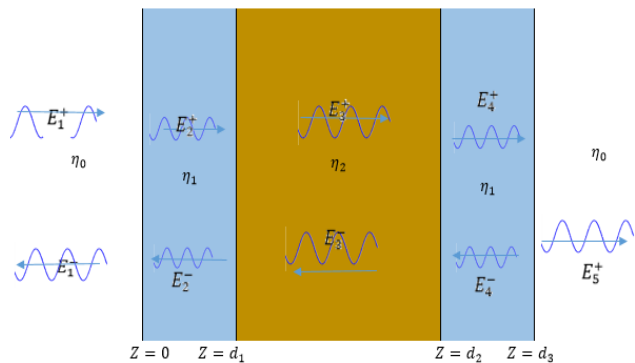


Fig. 2 Radiated and reflected fields in each layer of three-layer wall environment

شکل 2 تیغه سه لایه و میدان‌های تابشی و بازتابی در هر محیط

² Insertion Loss (IL)

¹ Insertion loss

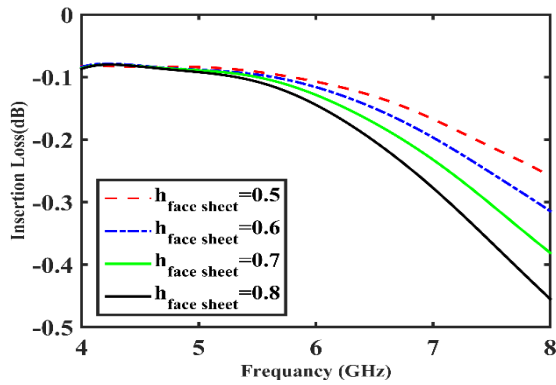


Fig. 8 The effect of increasing the face sheet thickness on S_{21} (CST results)

شکل 8 تأثیر افزایش ضخامت رویه‌ها بر روی S_{21} (نتایج نرم افزار CST) مطابق نتایج شبیه سازی‌های انجام شده و داده‌های تجربی الکترومغناطیسی موجود، جهت بررسی‌های مکانیکی، ساختارهای دوگانه‌ی جدول 2 برای ساخت و تست‌های دقیق‌تر پیشنهاد شده است.

3- طراحی و تحلیل مکانیکی

بار باد به عنوان یکی از مهم‌ترین بارگذاری‌های سازه‌ای برای رادوم شناخته می‌شود. محدودیت سرعت 220 کیلومتر بر ساعت (61 متر بر ثانیه) برای بیشینه سرعت باد در نظر گرفته شده است. با شبیه سازی جریان باد اطراف سازه‌ی کروی رادوم مشاهده می‌شود (شکل 9) که در نواحی اطراف، سرعت جریان عبوری افزایش می‌یابد. ارزیابی بارگذاری ناشی از وزش باد در شبیه ساز عددی Flow simulation بر اساس حجم کنترلی تعریف شده اطراف رادوم و در نظر گرفتن خواص ویسکوزیته‌ی هوا ($1.81 \times 10^{-5} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) بر مبنای معادلات عددی حجم محدود، برای هندسه‌ی رادوم با قطر 8 متری (80 درصد یک کره‌ی کامل) با کانتور سرعت باد نشان داده شده در شکل 10 انجام شده است. نتایج توزیع فشار روی رادوم در شکل 11 نشان داده شده است. توزیع نامتقارن فشار موجب اعمال بارهای کششی و فشاری روی سازه-ی رادوم می‌شود.

جدول 1 نتایج حاصل از مقایسه افزایش پارامترهای مختلف با تغییر ضریب دی الکتریک، ضخامت و تانژانت تلفات هسته

Table 1 Comparison results between different parameters increasing by changing the dielectric coefficient, thickness and core loss tangent

	h_{core}	$\tan \delta_{core}$	ϵ_{core}	h_{face}	$\tan \delta_{face}$	ϵ_{face}
IL	افزایش زیاد	افزایش زیاد	افزایش زیاد	افزایش	افزایش	افزایش
f_c	کاهش زیاد	کاهش زیاد	کاهش زیاد	کاهش	کاهش	کاهش
BW_{3dB}	کاهش زیاد	کاهش زیاد	کاهش زیاد	کاهش	کاهش	کاهش

جدول 2 پنل‌های مختلف جهت تست فضای آزاد در اتاق آنتن

Table 2 Different panels to test at free space in the antenna room

A	B	نمونه
شیشه / وینیل استر	شیشه / اپوکسی	ماده
کیسه خلا	لایه نشانی دستی	روش ساخت
10	20	ضخامت (mm)
2.9	2.7	ضریب دی الکتریک رویه‌ها
1.2	1.2	ضریب دی الکتریک هسته

الکتریک، پهنای باند فرکانسی و فرکانس مرکزی کاهش و افت عبوری افزایش می‌یابد.

بررسی اثر تلفات هسته بر روی پهنای باند فرکانس کاری، جابجایی فرکانسی و افت عبوری، برای نمونه‌ای با ضخامت هسته 15 میلی‌متر، ضخامت رویه‌های 0.8 میلی‌متر، ضریب دی الکتریک هسته برابر با 2.55، ضریب دی الکتریک رویه‌ها 3 تلفات رویه‌ها برابر با 0.01 بررسی شده است. تغییرات تانژانت تلفات هسته از صفر تا 0.04 در نظر گرفته شده است (شکل 7). نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با افزایش تانژانت تلفات لایه‌ها، پهنای باند فرکانس کاری و فرکانس مرکزی کاهش اما افت عبوری افزایش پیدا می‌کند. باید دقت شود که ضریب دی الکتریک یک ماده در حالت کلی دارای دو قسمت حقیقی و موهومی است. قسمت حقیقی معرف سرعت انتشار موج داخل ماده است. قسمت موهومی در واقع معرف مقدار افتی است که ماده در دامنه‌ی موج عبوری ایجاد می‌کند، که با پارامتر تانژانت تلفات معرفی می‌شود. با در نظر داشتن محدودیت افت عبوری 0.3dB و اختلاف قطبش 0.05dB، مقایسه‌ی بین پارامترهای طراحی در جدول 1 نشان داده شده است. در شکل 8 تأثیر افزایش ضخامت رویه‌ها بر میزان افت عبوری بررسی شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود تأثیر ضخامت رویه در فرکانس-های بالاتر بیشتر است و در محدوده‌ی فرکانس کاری 5.6 GHz این مقدار تغییرات چشمگیری ندارد.

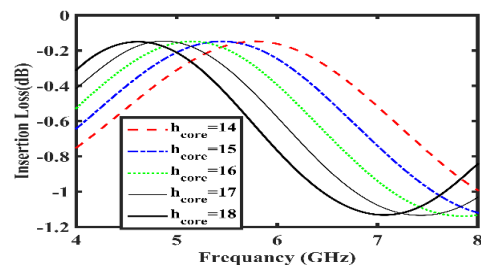


Fig.5 The effect of increasing the core thickness on S_{21} (CST results)

شکل 5 تأثیر افزایش ضخامت هسته بر روی S_{21} (نتایج نرم افزار CST)

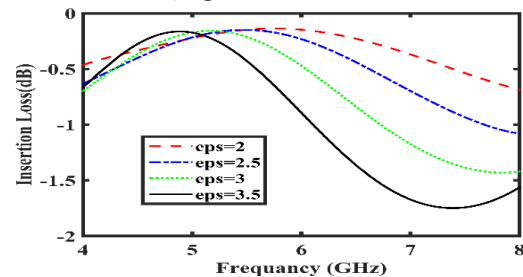


Fig. 6 The effect of changing different dielectric constants of the core on S_{21} (CST results)

شکل 6 تأثیر تغییر ثابت‌های دی الکتریک مختلف هسته بر S_{21} (نتایج نرم افزار CST)

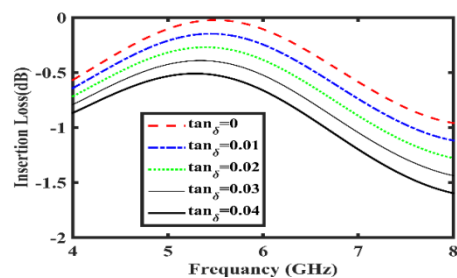


Fig. 7 The effect of core loss tangent variation on S_{21} (CST results)

شکل 7 تأثیر تغییر تانژانت تلفات هسته بر روی S_{21} (نتایج نرم افزار CST)

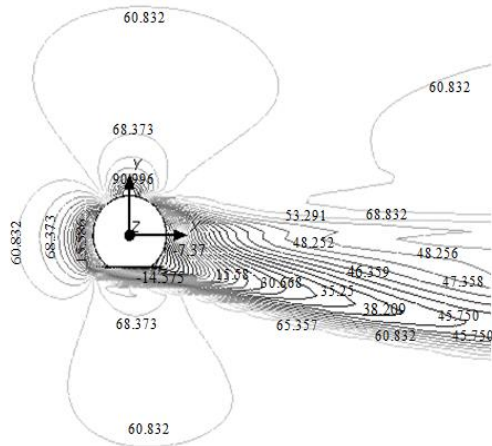


Fig. 10 Wind speed iso – velocity contours around the radome structure exposed to wind 220 km / h

شکل 10 کانتورهای سرعت باد اطراف رادوم مخابراتی در معرض باد 220 کیلومتر بر ساعت

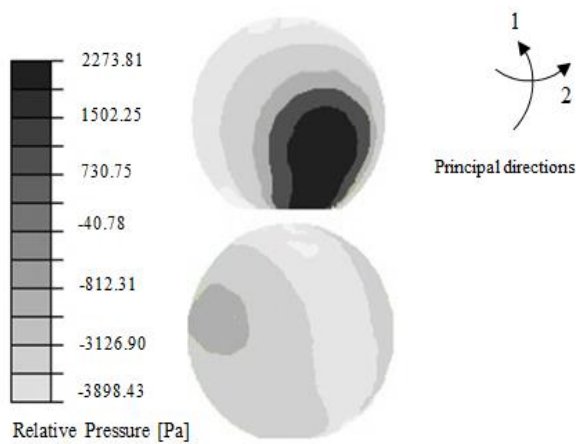


Fig. 11 Pressure distribution on the surface of the radome caused by wind speed 220 km/ h (Max. positive pressure 2273.81 Pa, Max. negative pressure 3898.43 Pa) (Above: facade view the wind; bottom: back view to the wind)

شکل 11 توزیع فشار روی سطح رادوم که در اثر باد با سرعت 220 کیلومتر بر ساعت ایجاد شده است (بیشترین بار فشار مثبت 2273.81 پاسکال و بیشترین بار فشاری منفی 3898.43 پاسکال) (بالا: نمای روبروی باد و پایین نمای پشت به باد)



Fig. 12 Some damaged weather radome samples due to severe storms [15, 16]

شکل 12 نمونه‌هایی از رادوم‌های آسیب دیده در اثر وزش بادهای شدید [15, 16]

خواص مکانیکی ($E=400 \text{ MPa}$, $\nu=0.5$, $\rho=55 \text{ kg/m}^3$) برای هسته‌ی رادوم و ($E_1=25 \text{ GPa}$, $E_2=15 \text{ GPa}$, $G_{12}=5 \text{ GPa}$, $G_{23}=5 \text{ GPa}$, $\nu_{12}=\nu_{21}$) برای رویه‌های رادوم آن در نظر گرفته شده است [14].

کانتورهای فشاری ناشی از باد، با ایجاد پارتیشن روی سازه‌ی ریدوم و با اعمال میدان فشار متوسط روی بخش‌های پارتیشن بندی شده، در نرم افزار آباکوس 6.14 اعمال شد. بجای مدل کردن تک تک لایه‌ها خواص معادل چند لایه، به لایه‌ی معادل با ضخامت کل، نسبت داده شده است. علت استفاده از این روش برای مدل‌سازی، سهولت استفاده از مدل نهایی برای شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی است. راستای الیاف برای مدل ارتوتروپیک شبیه‌سازی شده در مختصات قطبی و مشابه راستاهای گزارش شده در شکل 11 است. برای شبیه‌سازی از المان‌های پوسته‌ای (S4R) و از حلگر Buckle استفاده شده است.

3-1- طراحی و تحلیل عددی

بارهای کششی و فشاری ناشی از باد به‌عنوان عمده‌ترین بارهای سازه‌ی روی سازه‌ی ساندویچی رادوم هستند. از این رو برای ارزیابی تاثیر بارهای فشاری روی سازه، تحلیل کمانش روی بدنه‌ی رادوم انجام شده است. شرایط مرزی سازه مطابق نمونه‌ی واقعی (شکل 12) و به صورت کاملاً درگیر در لبه‌های پایینی رادوم در نرم افزار المان محدود آباکوس 6.12 مدل شده است. تنش‌های ناشی از وزش باد در شکل 13 نشان داده شده است. مقایسه‌ی شکل موده‌های کمانشی در تحلیل عددی رادوم (شکل 15) با نمونه‌های آسیب دیده‌ی گزارش شده (شکل 12) که باد به‌عنوان عامل تخریب آن‌ها گزارش شده است نشان می‌دهد که موده‌های پیش‌بینی شده هم‌خوانی خوبی با نمونه‌های تجربی برای پیش‌بینی محل آسیب دارند. 5 مود کمانشی رادوم به‌همراه شکل موده‌های کمانشی، در شکل 15 نشان داده شده است.

با اعمال بار فشاری پیش‌بینی شده روی ساختار کامپوزیت پنل رادوم، بیشترین تنش‌های درون صفحه‌های S11 و S22 و تنش برشی S12 مطابق شکل 13 محاسبه شده است.

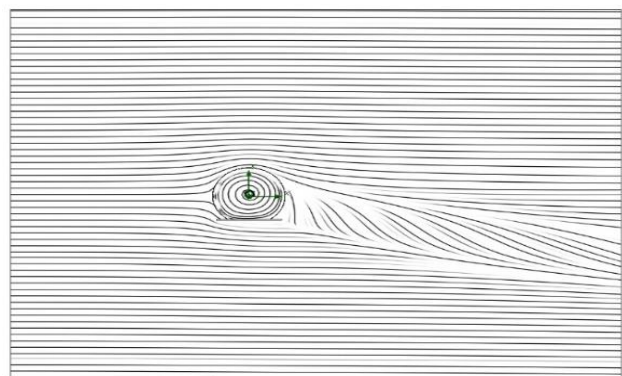


Fig. 9 Wind stream line around the 8 m diameter weather radome
شکل 9 مسیر جریان باد عبوری از روی رادوم هواشناسی با قطر 8 متر

برای ارزیابی مقاومت مکانیکی پنل پیشنهادی در برابر محتمل‌ترین آسیب یعنی کمانش، بار کمانشی پنل رادوم با انجام تست فشار لبه‌ای مطابق استاندارد ASTM C364 گزارش شده است.

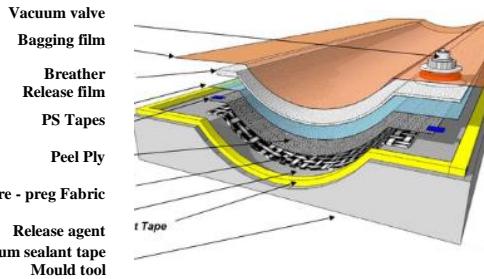


Fig. 14 An overview of the vacuum bagging process used to produce radome samples [17]

شکل 14 نمایی از فرایند کیسه خلا، استفاده شده برای تولید نمونه‌های رادوم [17]

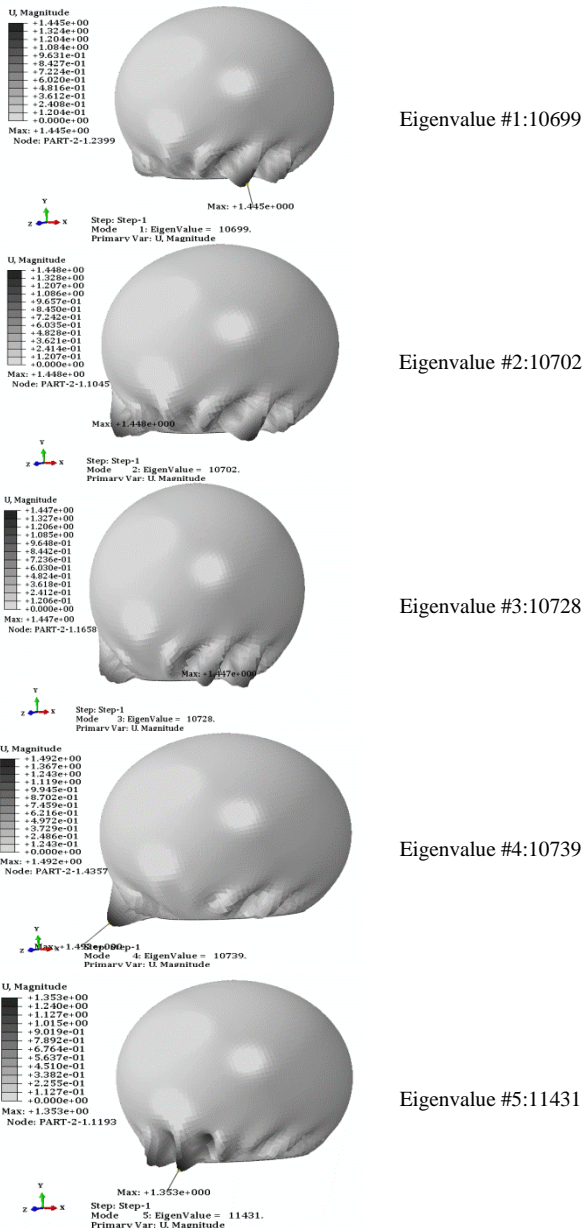


Fig. 15 Buckling mode shapes and eigenvalues for sandwich panel radome

شکل 15 شکل مودها و مقادیر ویژه کمانشی برای رادوم ساندویچ پنل

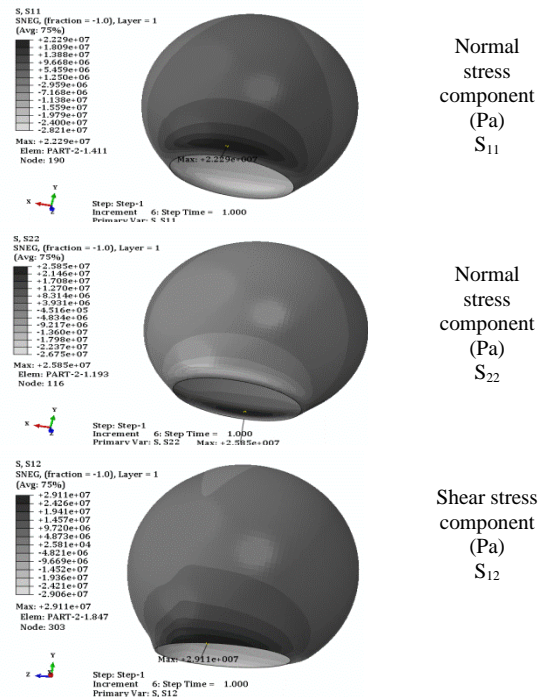


Fig. 13 Normal and shear stress contours of radome which exposed to 220 km/h wind (Max. in plane stress: 2.58 MPa and Max. shear stress: 2.91 MPa)

شکل 13 کانتورهای تنش نورمال و برشی رادوم، ناشی از باد 220 کیلومتر بر ساعت (بیشترین تنش درون مگاپاسکال و بیشترین تنش برشی 2.91 مگاپاسکال)

4- تست‌های تجربی

برای ارزیابی صحت طراحی‌های الکترومغناطیسی نمونه‌ای از پنل‌های پیشنهادی (جدول 2) مطابق روش پیشنهاد شده استخراج شده از نمونه‌های مشابه، ساخته و تست‌های اتاق آنتن و مکانیکی روی آن انجام شده است. برای فرایند کیسه خلا از مراحل مشابه (شکل 14) استفاده شده است.

نمونه‌ها در مرکز تحقیقاتی شهید قندی (مطابق شکل 16 و شکل 17) و تست‌های الکترومغناطیسی در اتاق آنتن دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است (شکل 18) و تلفات عبوری امواج الکترومغناطیسی در فرکانس باند C برای دو پلاریزاسون افقی و عمودی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همانطور که در شکل 19 نشان داده شده است، اندازه افت عبوری در نمونه پنل A در تمامی باند در راستای عمودی و افقی، کمتر از 0.3dB می‌باشد. اختلاف قطبش در همسایگی فرکانس 5.6GHz کمتر از 0.05dB می‌باشد و در بقیه باند هم شرایط مناسبی دارد. اما با توجه به شکل 19 در نمونه پنل B شرایط متفاوت است، به گونه‌ای که در فرکانس مجاور فرکانس 5.6GHz اندازه افت عبوری در راستای عمودی و افقی بیشتر از 0.3dB می‌باشد و اختلاف قطبش تقریباً در بیشتر باند بیشتر از 0.05dB است. باید دقت شود که پنل تست شده در آزمایشگاه آنتن، به دلیل محدودیت‌های جابجایی آنتن‌های فرستنده و گیرنده، به آنتن فرستنده چسبیده شده است که این امر باعث بوجود آمدن اندکی خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌شود. مثبت شدن مقدار افت عبوری در برخی فرکانس‌ها نیز به دلیل عملکرد لنز ماندنی پنل چسبیده شده به آنتن فرستنده است که باعث تطبیق بهتر آنتن و فضای انتشاری شده است.

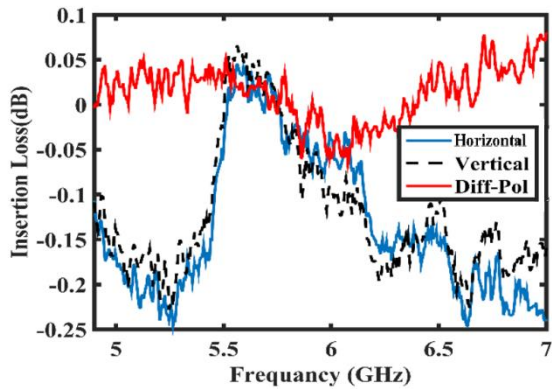


Fig. 19 Insertion loss in the vertical and horizontal position and the polarization difference of panel A

شکل 19 افت عبوری در راستای عمودی و افقی و اختلاف قطبش پنل

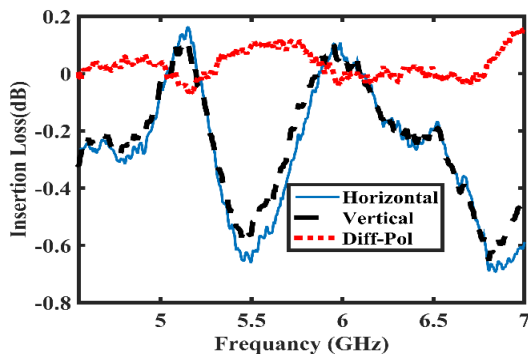


Fig. 20 Insertion loss in the vertical and horizontal position and the polarization difference of panel B

شکل 20 افت عبوری در راستای عمودی و افقی و اختلاف قطبش پنل B

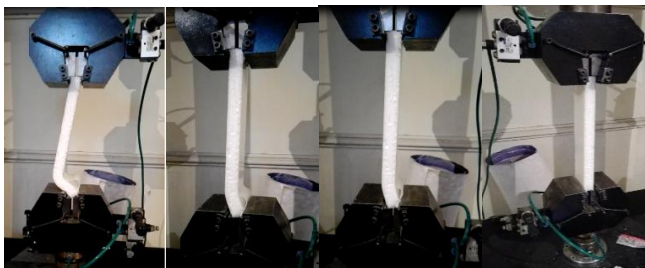


Fig. 21 Edgewise compression set – up and failure sequences of radome sandwich panel

شکل 21 نمایی از ست آپ تست و مراحل آسیب پنل ساندویچی رادوم تحت تست فشار لبه‌ای

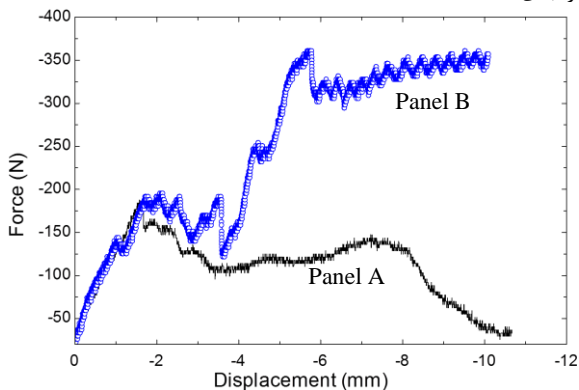


Fig. 22 Force – displacement diagram of the both A and B radome sandwich panel samples during edgewise compression test

شکل 22 نمودار نیرو – جابجایی نمونه ساندویچی پنل‌های رادوم حین تست فشار لبه-ای

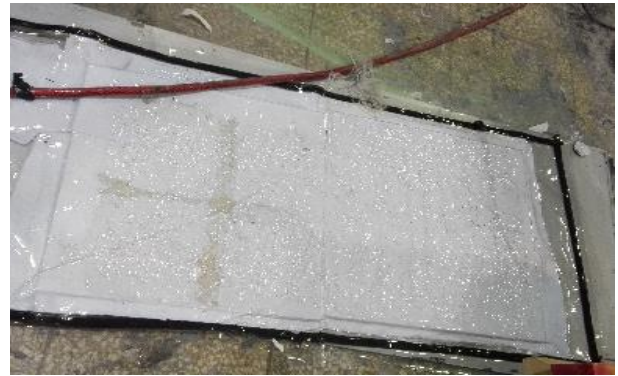


Fig. 16 Sandwich panel samples (300 mm×300 mm) manufacturing process by vacuum bag process

شکل 16 تولید نمونه‌های ساندویچی با استفاده از فرایند کیسه خلا برای نمونه‌های 300 میلی‌متر در 300 میلی‌متر



Fig. 17 Hand lay – up made sandwich panel sample prepared to electromagnetic tests

شکل 17 نمایی از نمونه ساندویچی پنل ساخته شده به روش دستی برای تست الکترومغناطیسی



Fig. 18 Test set – up for free space test in the antenna lab.

شکل 18 قرار گیری پنل‌ها برای تست فضای آزاد در اتاق آنتن

پس از اجرای تست‌های الکترومغناطیسی و اطمینان از نتایج افت عبوری برای دو قطبش عمودی و افقی، نمونه‌های ساخته شده برای تست فشار لبه-ای بر اساس استاندارد ASTM C364 سایز و برای تست مطابق (شکل 21) تست شده‌اند. تست‌ها با دستگاه سنتام 5 تنی انجام شده است. نتایج خروجی نیرو جابجایی در (شکل 22) نشان داده شده است.

5- بحث نتایج و جمع‌بندی

در این مقاله، به روند طراحی و ساخت اولین پنل ساندویچی در ایران برای کاربرد رادوم رادار هواشناسی، پرداخته شده است. دو نمونه از پنل‌های طراحی شده، تحت اندازه‌گیری‌ها و تست‌های الکترومغناطیسی و مکانیکی قرار گرفته و نتایج تست‌ها مورد بحث قرار گرفته است.

از آنجا که ضخامت هسته نسبت به لایه‌ها به مراتب بزرگتر است، اثر تغییرات هسته بیشتر از لایه‌ها می‌باشد. همانطور که در جدول 1 نشان داده شده است با افزایش تانژانت تلفات، افت عبوری ساندویچ طراحی شده افزایش یافته و به عکس فرکانس مرکزی و پهنای باند 0.3dB، کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت رویه، افت عبوری افزایش و به عکس فرکانس مرکزی و پهنای باند 0.3dB، کاهش می‌یابد. با افزایش ثابت دی الکتریک هم افت عبوری افزایش و به عکس فرکانس مرکزی و پهنای باند 0.3dB، کاهش می‌یابد.

با عنایت به نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی، پنل نمونه A با ضخامت 10 میلی‌متر، دارای افت عبوری بهتر از 0.3dB و اختلاف افت عبوری برای دو قطبش بهتر از 0.05dB در باند فرکانسی کاری (5.6 تا 5.8 گیگاهرتز) است.

با توجه به این که کماتش در مودهای آسیب‌سازهای نقش بسزایی دارد، به بررسی میزان بار کماتش پنل‌های نمونه‌ی ساخته شده، پرداخته شد. در این بررسی، دو روش مختلف ساخت و دو هندسه مختلف باهم مقایسه شدند. هندسه‌ها متناسب با طراحی نهایی تیم میدان و با در نظر داشتن محدودیت‌های الکترومغناطیسی انتخاب شده‌اند و از این رو از نظر تنوع، محدود شده‌اند. بررسی کماتش سازه با توجه به این‌که در ASTM تست خاصی بدان اختصاص داده نشده و در قالب بررسی نتایج تست‌های دیگر گزارش شده، بر اساس چیدمان تست ASTM C364 طرح ریزی شده است.

نتایج ارزیابی مکانیکی پنل برای بررسی بیشینه بار کماتشی پنل، نشان می‌دهد که پنل با ضخامت 20 میلی‌متر و ساخته شده به روش دستی، با صرف نظر کردن کماتش موضعی لبه‌های اطراف فک‌ها، 370 نیوتن بار لبه‌ای را تحمل می‌کند و این در حالی است که پنل با ضخامت هسته‌ی 10 میلی‌متر که با روش کیسه خلا ساخته شده است، 190 نیوتن بار لبه‌ای را تحمل می‌کند. از آنجایی که در رادوم‌های مخابراتی از چند پنل برای ساخت کره استفاده می‌شود و محل اتصال پنل‌ها با اتصالاتی که غیر ساندویچی هستند ساخته می‌شود، لذا بار کماتش محاسبه شده در این مقاله به عنوان بار کماتش کل رادوم نبوده و نیازمند طراحی و ساخت مجموعه‌ی پنل‌های رادوم است. طراحی و ساخت اتصال‌های پیچی بین پنل‌های ساندویچی رادوم مد نظر و بار کماتش کل رادوم (سرعت باد متناظر) به عنوان موضوعی است که در پژوهش‌های آتی در دست اجرا است.

6- مراجع

- [1] Oliner, A.A. Jackson, D.R. Volakis, J.L., "Antenna engineering handbook", McGraw Hill, 2007
- [2] Europe, S. T. "Installation and operation manual for sea tel model 14600-50 redundant C-band TX/RX antennas", 2007.
- [3] Shepherd, G.W. Searson, J. Pallot, A. Collier, C.G., "The performance of a C-Band weather radar during a line convection event", Meteorological Applications. 1995 .
- [4] Nakagawa, K. Hanado, H. Satoh, S. Takahashi, N. Iguchi, T. Fukutani, K., "Development of a new C-band bistatic polarimetric radar and observation of typhoon events", paper presented at 31st Conference on Radar Meteorology, Am. Meteorol. Soc., Seattle, Wash, 2007

- [5] Scott M. H., "Radiation pattern calculation for missile radomes in the near field of an antenna, Naval postgraduate School Monterey, California, 1996
- [6] Mokhtari, M. Shahravi, M., "Numerical and experimental analysis of dynamical behavior of composite T-joint with step wise graded adhesive zone based on functional behavior model", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 319-326, 2017. (In Persian)
- [7] Ebadi-Rajoli, J. Mokhtari, M., "Comparison of numerical analysis methods for progressive damage analysis in composite bolted joints and suggestion of new method for bolted joints analysis", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 2, pp. 63-70, 2015. (In Persian)
- [8] Khalili, S.M.R. Mokhtari, M., "Numerical Study of Adhesive Single-Lap Joints with Composite Adherends Subjected to Combined Tension-Torsion Loads", The Journal of Adhesion, Vol. 91, No 3, pp. 214-234, 2014.
- [9] IRIMO, Available: <http://www.irimo.ir>, 2017.
- [10] Li, P. LI, N. XU, W. Song, L. "Phase Compensation of Composite Material Radomes Based on the Radiation Pattern" Chin. J. Mech. Eng., Vol. 30, p. 587-594, 2017.
- [11] Kozakoff, D. J., "Analysis of Radome-Enclosed Antennas", Artech House, 2010.
- [12] Cheng, D. K., "Field and wave electromagnetics", Proc. Int. Conf. on Power System Reliability, Singapore, 1999.
- [13] Knott, E. F., "Radar Cross Section Measurements", SciTech Publishing, 1985.
- [14] Mokhtari, M., Salari, M. Abdoli, H., "Design and Manufacturing of Engineering Model of GEO Satellite Ku Band Antenna-Structural Design Reportation", Shahid Ghandi Center of Research, Tehran, 2014 (In Persian).
- [15] Reno, Nevada radar dome failure. 2017. Available: <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/1581>
- [16] Radar Sampled by Thunderstorm, Roger Edwards, Storm Prediction Center, Available: <http://www.spc.noaa.gov/coolimg/rmuncher.ht>. 2017
- [17] VARTM-Rresin infusion process, Available: <http://www.compositesuniversal.com/manufacturing-6.html>. 2017.