

محاسبه و اندازه گیری ضرایب کوپلاژ و کیفیت با استفاده از نمودار افت انرژی و پتانسیل الکتریکی در کاواک شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی

جباری، ایرج^{*۱}؛ پورصالح، علی محمد^۱؛ خلفی، حسین^۲

^۱ گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان

^۲ مجتمع پژوهشی ایران مرکزی (یزد)، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده:

در این مقاله ضمن بررسی روابط حاکم و روش‌های اندازه‌گیری ضرایب کیفیت و کوپلاژ در کاواک شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی، یک کاواک کواکسیال آلومینیومی کوچک با فرکانس تشدید ۳۱۶ مگاهرتز به عنوان مدلی جهت تست‌های آزمایشگاهی و صحت‌گذاری بر نتایج محاسباتی و تجربی ساخته شد. مقایسه نتایج حاصل از محاسبات، تست‌های تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که ضریب کیفیت خارجی به دست آمده از نمودار افت انرژی در کاواک و همچنین مقدار ضریب کیفیت بارگذاری شده حاصل از نمودار افت پتانسیل در کاواک، دقت بالاتری نسبت به مقادیر مشابه بدست آمده از طریق شبیه‌سازی به طور مستقیم از نرم‌افزار CST دارد.

کلمات کلیدی: ضریب کوپلاژ، ضریب کیفیت خارجی، کاواک کواکسیال، شتاب‌دهنده موج رادیویی

مقدمه:

ضرایب کیفیت کاواک یکی از پارامترهای اساسی در شتاب‌دهنده‌های الکترونی RF می‌باشد. این ضریب بدون کوپلر تزویج توان را ضریب کیفیت بدون بارگذاری می‌نامند. ولی هنگامی که کوپلر تزویج توان به کاواک اضافه می‌گردد بحث ضریب کیفیت خارجی و همچنین ضریب کیفیت بارگذاری شده مطرح است [۱]. محاسبه ضریب کیفیت خارجی و ضریب کوپلاژ یک کاواک با حضور کوپلر از مسائل مهم در طراحی شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی محسوب می‌شود. به طور کلی سه روش برای تزویج توان RF به کاواک شتاب مرسوم است که عبارتند از استفاده از کوپلاژ مغناطیسی بوسیله حلقه در انتهای خط انتقال کواکسیال، ایجاد سوراخ یا روزنه در دیواره محفظه و اتصال آن به موجبر انتقال امواج RF و کوپلاژ الکتریکی بوسیله پراب یا آنتن میله‌ای شکل که در انتهای هادی مرکزی خط انتقال هم محور استفاده می‌شود. برای شتاب‌دهنده‌های ذرات در فرکانس پائین اغلب از کوپلاژ مغناطیسی به وسیله حلقه استفاده می‌شود و استفاده از شکاف متصل به موجبر و همچنین پراب در

فرکانس بالا رایج است [۲]. برای ساختار کوپلاژ یک خط انتقال، یک پارامتر به نام β تعریف می‌شود که مقیاسی از کوپلاژ خط انتقال به محفظه شتاب‌دهنده است. برای انتقال حداکثر توان از تقویت کننده به کاواک باید کوپلر به گونه‌ای طراحی شود که دارای بهترین ضریب کوپلاژ باشد. یک کوپلر در حالت ایده آل دارای ضریب کوپلاژی برابر یک است. در این حالت تمام توان داده شده به کوپلر به کاواک منتقل می‌شود [۳]. روش‌های متعددی برای محاسبه ضریب کیفیت خارجی ارائه شده است [۴ و ۵]. در این تحقیق روش محاسبه ضرایب کیفیت خارجی و بارگذاری شده از طریق نمودار افت انرژی و پتانسیل در یک کاواک کوکسیال در باند فرکانسی UHF با کوپلر حلقوی بررسی شده است.

روش کار:

ابتدا برای دست یابی به روابط مورد نیاز جهت محاسبات مربوط به ضرایب کیفیت و کوپلاژ به بررسی تئوری و روابط حاکم بر ضرایب مذکور در کاواک کوکسیال با کوپلر حلقوی پرداخته شده است. از نظر تئوری ضریب کیفیت بدون بارگذاری در داخل یک کاواک از رابطه $Q_0 = \omega_0 \frac{W}{P_c}$ قابل محاسبه است که در آن W انرژی ذخیره شده در داخل کاواک و P_c توان تلفاتی کاواک است. در صورتی که یک کوپلر به کاواک اضافه گردد به صورت متناظر ضریب کیفیت خارجی از رابطه $Q_{ext} = \frac{\omega W}{P_e}$ قابل محاسبه است که در آن P_e توان تلفاتی مربوط به کوپلر است. همچنین ضریب کوپلاژ بدون حضور باریکه الکترونی از حاصل تقسیم ضریب کیفیت بدون بارگذاری بر ضریب کیفیت خارجی مطابق رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۶].

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} \quad (1)$$

ضریب کیفیت بدون بارگذاری کاواک کوکسیال از رابطه (۲) به دست می‌آید [۷] که در آن R_b شعاع هادی بیرونی و R_a شعاع هادی داخلی و L طول کاواک است.

$$Q_0 = \frac{\omega_0 \mu}{R_s \left[\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{4}{L} \right]} \quad (2)$$

همچنین Q_0 از طریق شبیه سازی به طور مستقیم قابل محاسبه است. لیکن برای محاسبه Q_{ext} روش‌های متعددی وجود دارد. هرچند که برخی نرم افزارها نظیر CST نیز به طور مستقیم Q_{ext} را محاسبه می‌کند، ولی دقت محاسبه آن باید تست شود که در این تحقیق بررسی خواهد شد. یکی از روش‌های تجربی مناسب مورد استفاده

برای محاسبه ضریب کیفیت خارجی استفاده از منحنی افت انرژی در داخل کاواک است. برای این منظور می‌توان Q_{ext} را با محاسبه افت میدان الکتریکی بر حسب زمان از رابطه (۳) به دست آورد [۸].

$$Q_{ext} = -\frac{10 \cdot \omega_0}{K \cdot \ln 10} \quad (3)$$

که K ضریب شیب افت انرژی است. برای سادگی محاسبات رابطه فوق را می‌توان به صورت رابطه ۴ نشان داد.

$$Q_{ext} = \frac{20\pi f(\text{GHz}) \Delta t(\text{ns})}{\ln 10 \Delta E(\text{dB})} \quad (4)$$

جهت صحت‌گذاری رابطه (۴) نتیجه حاصل از این رابطه با نتیجه مستقیم اندازه‌گیری Q_{ext} با نرم افزار CST مقایسه خواهد شد. یکی از روش‌های تجربی محاسبه Q_{loaded} نیز استفاده از محاسبه زمان افت سیگنال پتانسیل میدان الکتریکی به $1/e$ دامنه آن در کاواک و استفاده از رابطه (۵) می‌باشد [۹].

$$Q_{load} = \pi \cdot \Delta t \cdot f_0 \quad (5)$$

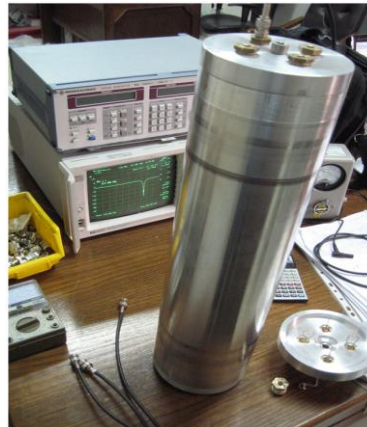
رابطه Q_{loaded} با Q_{ext} و Q_0 به صورت رابطه (۶) نیز می‌توان بیان کرد [۱۰].

$$\frac{1}{Q_{loaded}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (6)$$

برای مقایسه نتایج حاصل از روابط محاسباتی و همچنین نتایج شبیه‌سازی نسبت به ساخت یک کاواک کواکسیال کوچک آلومینیومی مطابق شکل ۱ اقدام شد.



شکل ۲: نمونه پراب و کوپلر اندازه‌گیری



شکل ۱: کاواک مدل در حال تست

ارتفاع این کاواک ۴۷۴ میلی متر و شعاع داخلی و بیرونی آن به ترتیب ۱۶ و ۵۷ میلی متر می‌باشد. اندازه‌گیری ضریب کیفیت بدون بارگذاری با استفاده پراب کوچک مطابق قسمت بالای شکل ۲ و بر اساس محاسبه پهنای

باند در افت 3dB- برنمودار حاصل از اندازه گیری S11 انجام شد [۱۰]. چنانچه در شکل مشهود است اندازه این پراب به گونه‌ای است که در هنگام اتصال به کاواک تاثیری بر فرکانس و همچنین ضریب کیفیت ندارد. کوپلر حلقوی طراحی شده مورد استفاده در این کاواک مطابق قسمت پایین شکل ۲ می‌باشد. با حضور این کوپلر ضریب کیفیت خارجی و بار گذاری شده مطرح می‌گردد که با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی و شبیه‌سازی، ضریب کوپلاژ مربوط به این کوپلر محاسبه شد.

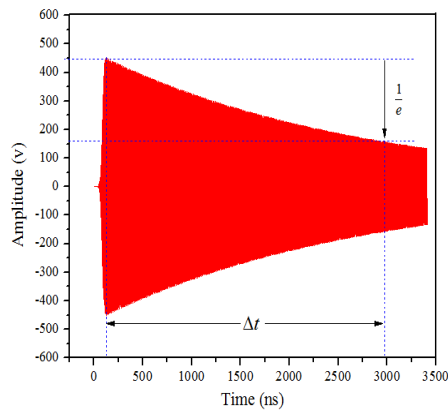
نتایج:

در جدول ۱ نتایج مربوط به فرکانس تشدید و ضریب کیفیت بدون بارگذاری به دست آمده از طریق شبیه‌سازی با نرم افزارهای CST [۱۱]، SUPERFISH [۱۲] و HFSS [۱۳]، محاسبات تحلیلی و همچنین نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی در کاواک آلومینیومی ساخته شده نشان داده شده است.

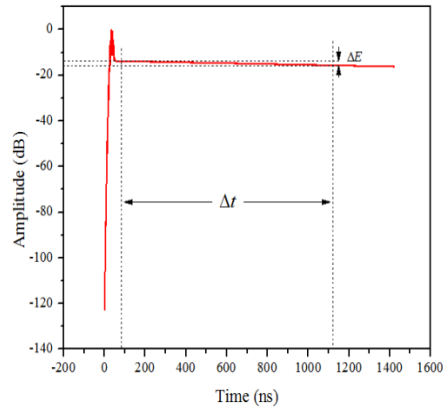
جدول ۱: فرکانس تشدید و ضریب کیفیت بدون بارگذاری کاواک مدل

اختلاف	آزمایشگاهی	محاسباتی	شبیه سازی			پارامتر
			CST	HFSS	SUPERFISH	
۰/۱۶	۳۱۶/۲۹	۳۱۶/۴۵	۳۱۶/۵۲	۳۱۶/۵۹	۳۱۶/۴۹	فرکانس تشدید (مگاهرتز)
۱۰۶	۵۸۹۷	۶۰۰۳	۶۰۴۲	۶۰۱۷	۶۰۲۱	ضریب کیفیت بدون بارگذاری

با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌گردد که فرکانس تشدید کاواک و ضریب کیفیت بدون بارگذاری حاصل از محاسبه تحلیلی و شبیه‌سازی به هم نزدیک می‌باشد و اختلاف کوچک آن با مقدار تجربی به دلیل خطای ساخت و همچنین حضور پراب اندازه‌گیری در کاواک است. نمودار افت انرژی در کاواک به منظور محاسبه ضریب کیفیت خارجی کاواک با حضور کوپلر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار افت پتانسیل الکتریکی در کاواک



شکل ۳: نمودار افت انرژی در کاواک

Δt بر حسب نانو ثانیه و ΔE بر حسب دی سی بل از نمودار استخراج شده و پس از جاگذاری آن در رابطه (۴) ضریب کیفیت خارجی برابر ۵۲۸۶ به دست آمد. همچنین ضریب کیفیت بارگذاری شده از نمودار افت پتانسیل الکتریکی مطابق شکل ۴ و استفاده از رابطه (۵) به میزان ۲۸۱۲ بدست آمد. مقادیر بدست آمده برای ضریب کیفیت بدون بارگذاری، خارجی و بارگذاری شده و ضریب کوپلاژ از شبیه‌سازی با نرم افزار CST در محیط Eigenmode Solver به همراه نتایج حاصل از محاسبه و تست‌های تجربی در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه ضریب کیفیت خارجی در حالت محاسباتی ضریب کوپلاژ به صورت ایده ال و برابر یک در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: مقادیر ضریب کیفیت و ضریب کوپلاژ در کاواک مدل با کوپلر توزیع توان

ضریب کوپلاژ	ضریب کیفیت (بارگذاری شده)	ضریب کیفیت (خارجی)	ضریب کیفیت (بدون بارگذاری)	روش
۱/۰۵	۳۰۱۴	۵۷۴۲	۶۰۴۲	شبیه سازی
۱	۳۰۰۱	۶۰۰۳	۶۰۰۳	محاسباتی
۱/۱۱	۲۷۹۲	۵۳۰۲	۵۸۹۷	آزمایشگاهی

در صورتی که مقادیر شبیه سازی بدست آمده در جدول ۲ را با مقادیر بدست آمده برای ضریب کیفیت خارجی از طریق نمودار افت انرژی و همچنین ضریب کیفیت بارگذاری شده از طریق نمودار افت پتانسیل الکتریکی

مقایسه شود مشاهده می‌گردد که مقادیر به دست آمده از نمودارهای افت انرژی (۵۲۸۶) و پتانسیل الکتریکی (۲۸۱۲) تطابق بهتری با رابطه (۶) که رابطه اصلی بین ضرایب کیفیت را بیان می‌کند و همچنین مقدار اندازه گیری به صورت تجربی دارد. به عبارت دیگر مقادیر بدست آمده از طریق نمودار دقت بیشتری نسبت به مقادیری که بطور مستقیم از نرم افزار CST به دست می‌آید، دارد.

بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق برای محاسبه ضرایب کیفیت با دقت بالا و مقایسه آن با مقادیر به دست آمده از شبیه سازی به طور مستقیم، ضمن بررسی روش‌های اندازه‌گیری و روابط حاکم بر ضرایب کیفیت و کوپلاژ، برای صحنه گذاری بر نتایج حاصل از محاسبه و شبیه‌سازی یک کاواک کواکسیال کوچک آلومینیمی در باند فرکانسی UHF ساخته شد. نتایج حاصل از محاسبه و تست‌های تجربی نشان داد که مقادیر بدست آمده برای ضریب کیفیت خارجی و بارگذاری شده از طریق نمودارهای افت انرژی و پتانسیل در کاواک، دقت بالاتری نسبت به مقادیری که به طور مستقیم از شبیه سازی با نرم افزار CST حاصل می‌گردد، دارد. لذا این روش اندازه‌گیری روشی مناسب برای محاسبه ضرایب کیفیت خارجی و بارگذاری شده می‌باشد.

مراجع:

- [1] H. Ego, "RF input coupler with a coupling tuner for an RF acceleration cavity", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 564, pp:74-80, 2006.
- [2] R.E. Collin, Foundations for Microwave Engineering. Second edition, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [3] D.M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 2011.
- [4] J.M. Han, et al, "RF coupler design for the KTF RFQ Linac", Proceeding of the particle accelerator conference, Chicago, pp:1210-1212, 2011.
- [5] I.E. Campisi, "Fundamental power couplers for superconducting cavities", Proceedings of 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2001.
- [6] J. Gao, "Analytical formula for the coupling coefficient β of a cavity waveguide coupling system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 309, pp:5-10, 1991.
- [7] T. Wangler, Principles of RF linear accelerators, John Wiley & Sons, 2002.
- [8] G. Dôme, "Basic RF theory, waveguides and cavities", CERN92-03, Vol. I, pp:1-96, 1992.
- [9] J. Shi, et al, "Comparision of measured and calculated coupling between a waveguide and an RF cavity using CST microwave studio", Proceedings of EPAC 2006, Scotland, 2006.

- [10] H. Padamsee, J. Knobloch and T. Hays, RF Superconductivity for accelerators, New York, John Wiley & Sons INC, 1998.
- [11] CST MICROWAVE STUDIO, Computer Simulation Technology,
<https://www.cst.com/products/cstmws>.
- [12] K. Halbach and R.F. Holsinger, *SUPERFISH-a computer program for evaluation of RF cavities with cylindrical symmetry*, Part. Accel. 7 (1976) 213.
- [13] ANSYS HFSS: High Frequency Electromagnetic Field Simulation,
<http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>.