



## بررسی دینامیک باریکه‌ی کاواک شتاب‌دهی موج ایستای طراحی شده برای شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون ۶ مگا الکترون ولت

سارا زارعی<sup>۱</sup>، فریدون عباسی دوانی<sup>۲\*</sup>، محمد لامعی رشتی<sup>۱</sup>، فرشاد قاسمی<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران  
۲. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

**چکیده:** کاواک‌های شتاب‌دهی موج ایستای جفت‌شده‌ی جانبی به علت گرا دیان شتاب‌دهی نسبتاً بالا و حساسیت نسبتاً کم نسبت به خطای ساخت، در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون با انرژی پایین کاربرد گسترده‌ای دارند. مهم‌ترین گزینه در طراحی کاواک‌های شتاب‌دهی، برهم‌کنش مؤثر ذره و میدان‌های الکترومغناطیسی برای رساندن خوشه‌های الکترون به انرژی مورد نظر با بیش‌ترین راندمان و کیفیت مناسب باریکه‌ی خروجی است. بررسی دینامیک باریکه برای تعیین مشخصات باریکه‌ی خروجی از کاواک ضروری است. در این مقاله با استفاده از کد استرا، دینامیک باریکه‌ی کاواک شتاب‌دهی ۶ MeV بررسی شده است. کاواک مورد نظر به منظور تشدید در مد عملکردی  $\pi/2$  با فرکانس ۲۹۹۸.۵ MHz طراحی شده است که با لامپ مگنترون با بیشینه توان ۲/۳ MW تغذیه می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پس از ساخت کاواک طراحی شده، برای باریکه‌ی خروجی، گسیلندگی در جهت افقی و عمودی، نیم‌رخ عرضی در جهت عمودی و افقی، و گستردگی انرژی به ترتیب مقادیر ۴/۱۸ pi-mm-mrad، ۱/۲۵ mm و ۰/۸۴ MeV مورد انتظار است.

**کلیدواژه‌ها:** دینامیک باریکه، کاواک شتاب‌دهی موج ایستا، کد استرا، برهم‌کنش الکترون و میدان الکتریکی

## Beam Dynamic Study of a Designed Accelerating Cavity for 6 MeV Linac

S. Zarei<sup>1</sup>, F. Abbasi Davani<sup>2\*</sup>, M. Lamehi Rachti<sup>1</sup>, F. Ghasemi<sup>1</sup>

1. Physics and Accelerators School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran  
2. Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran – Iran

**Abstract:** Side coupled standing wave accelerating cavities are widely used in a low energy linear accelerator because of relatively high accelerating gradient and low sensitivity to construction tolerances. The effective interaction of particles and electromagnetic fields is important to accelerate electrons to the intended energy with the greatest efficiency and beam quality output. Beam dynamics study is essential for determining the coordinates of the output beam from the cavity. In this paper, we present the beam dynamics of a 6 MeV accelerating cavity using a space charge tracking algorithm (ASTRA). The designed accelerating cavity that feeds by magnetron with a maximum power of 3.2 MW is operating in  $\pi/2$  mode at a frequency of 2856 MHz. The results show that after the construction of the designed cavity, the vertical and horizontal emittances of the output beam, the transverse profile and the beam energy spread respectively 3.55 pi-mm-mrad, 1 mm and 0.88 MeV as expected.

**Keywords:** Beam Dynamics, Standing-Wave Accelerating Cavity, ASTRA, Electromagnetic Field and Electron Interaction



## ۱. مقدمه

سیستم‌های تک‌انرژی (تصاویر سیاه و سفید) و هم دو انرژی (تصاویر رنگی) استفاده می‌شود [۳].

کاواک‌های موج ایستا نیز براساس مد نوسانی درون آنها و هم چنین نحوه‌ی چیدمان کاواک‌های جفت‌شده و شتاب‌دهی، انواع مختلفی دارند. به منظور داشتن گرادیان شتاب‌دهی بیش‌تر و حساسیت کم‌تر به خطای ساخت، کاواک‌های موج ایستا از نوع جفت‌شده‌ی جانبی با مد عملکردی  $\pi/2$  انتخاب شده‌اند [۴].

هدف این مقاله، بررسی دینامیک باریکه در کاواک موج ایستا از نوع جفت‌شده‌ی جانبی با نرم‌افزار استرا است که به منظور شتاب‌دهی به باریکه‌ی الکترون تا انرژی ۶ MeV استفاده می‌شود.

در این مقاله پس از تشریح مراحل طراحی کاواک شتاب‌دهی، دینامیک باریکه‌ی آن بررسی شده است. برای این منظور پس از تشریح اهمیت بررسی دینامیک باریکه و معرفی کد مورد استفاده، پارامترهای مهم مورد بررسی و نحوه‌ی تعریف پارامترهای ورودی به کد توضیح داده، و در نهایت پارامترهای باریکه‌ی خروجی و عملکرد کاواک مورد نظر ارزیابی شده است.

## ۲. روش طراحی

به طور کلی برای انواع کاواک‌های شتاب‌دهی، چندین مرحله‌ی طراحی وجود دارد. اولین مرحله‌ی طراحی، شبیه‌سازی کاواک به لحاظ الکترومغناطیسی است که براساس عبور امواج الکترومغناطیسی درون ساختارهای موجبری و حل معادلات ماکسول درون این ساختارها استوار است. برای انجام شبیه‌سازی‌های این مرحله، با توجه به نوع ساختار می‌توان از نرم‌افزارهای مختلفی از جمله سوپرفیش<sup>(۳)</sup> [۵]، سی.اس.تی<sup>(۴)</sup> [۶]، کامسول<sup>(۵)</sup> [۷]، اچ.اف.اس.اس<sup>(۶)</sup> [۸] و سایر نرم‌افزارهای مشابه استفاده کرد. با انجام این مرحله از طراحی، پارامترهای الکترومغناطیسی ساختار برای شتاب‌دهی حاصل می‌شوند. طراحی دقیق ابعاد برای دست‌یابی به این پارامترهای میدان‌های الکترومغناطیسی و در نتیجه مشخصات باریکه‌ی خروجی بسیار حائز اهمیت است.

پس از طراحی الکترومغناطیسی، دینامیک طولی و عرضی باریکه‌ی درون این ساختارها بررسی می‌شود. در حقیقت مطالعه-

شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون که به‌اختصار به آن‌ها لینک<sup>(۱)</sup> نیز گفته می‌شود، از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که کاواک شتاب‌دهی از بخش‌های اصلی آنها به شمار می‌رود. شتاب‌دهنده‌ی خطی را می‌توان براساس کاواک شتاب‌دهی به شتاب‌دهنده‌ی موج رونده و موج ایستا تقسیم‌بندی کرد. در کاواک‌های شتاب‌دهی موج رونده، توان RF از یک‌جهت ساختار تزریق می‌شود و درون ساختار شتاب‌دهنده پیش می‌رود و در انتهای ساختار

باقی‌مانده، به سمت بار هدایت، و درون بار جذب می‌شود. در شتاب‌دهنده‌های موج ایستا، ابتدا و انتهای ساختار شتاب‌دهنده به‌طور مؤثری اتصال کوتاه است تا توان RF درون ساختار بازتاب شود و از مجموع توان رفتی و برگشتی برای شتاب‌دهی استفاده شود. هر کدام از این نوع شتاب‌دهنده‌ها مزایا و معایبی دارند [۱].

شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون کاربردهای متنوعی در صنعت، پزشکی، تحقیقات علمی و غیره دارند. دو زمینه‌ی کاربرد وسیع شتاب‌دهنده‌های خطی عبارتند از درمان سرطان در پزشکی و بازرسی محموله‌های کامیونی<sup>(۲)</sup> در مبادی ورودی و خروجی کشورها.

در پزشکی، از شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون در بازه‌ی انرژی ۴ تا ۱۸ MeV برای درمان سرطان استفاده می‌شود. می‌توان از باریکه‌ی الکترون خروجی مستقیماً (مد الکترون)، و یا از فوتون‌های ترمزی حاصل از تابش الکترون به فلزی سنگین (مد فوتون) برای درمان استفاده کرد. پیشینه‌ی انرژی فوتون‌های ترمزی با انرژی الکترون‌های خروجی برابر است. فوتون با انرژی ۶ MeV به منظور درمان اکثر تومورهای سرطانی مناسب است [۲].

شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون هم‌چنین در سامانه‌های بازرسی محموله‌های کامیونی بسیار پرکاربرد هستند و شرکت‌ها و مؤسسات تحقیقاتی مختلف در آمریکا، چین، انگلیس و روسیه در زمینه‌ی ساخت این سامانه‌ها فعال هستند [۳]. در این سیستم‌ها با توجه به ضریب تضعیف پرتو ایکس در مواد مختلف، استفاده از انرژی ۲/۵ تا ۹ MeV رایج است. شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون ۶ MeV پرکاربردترین نوع در این زمینه است که هم در



خروجی انجام خواهد شد. در جدول ۱ مشخصات کاواک مورد نظر ارائه شده است.

**جدول ۱.** مشخصات خروجی کاواک مورد نظر

پارامتر	مقدار
فرکانس تشدید (MHz)	۲۹۹۸٫۵
انرژی خروجی کاواک (MeV)	۶
توان ورودی رادیو فرکانسی (MW)	۲٫۳
نوع ساختار	موج ایستا
مد نوسان	$\pi/2$
نوع جفت‌شدگی بین کاواک‌ها	جفت‌شده‌ی جانبی
نحوه‌ی انتقال توان به کاواک	موجبر

با در نظر گرفتن مشخصات کاواک، مرحله‌ی اول شبیه‌سازی با استفاده از کد سوپرفیش و نرم‌افزار کامسول انجام شده است [۱۷]. در شکل ۱، شمای کلی کاواک موج ایستای جفت‌شده‌ی جانبی طراحی شده در نرم‌افزار کامسول نشان داده شده است و در جدول ۲ نیز مشخصات کاواک‌های شتاب‌دهی و کوپلینگ ارائه شده‌اند.

در نرم‌افزار کامسول، بسیاری از پارامترهای الکترومغناطیسی کاواک محاسبه می‌شود (در جدول ۳ برخی از پارامترهای کاواک طراحی شده ارائه شده‌اند) اما تنها خروجی این مرحله که ورودی کد استرا نیز هست، میدان الکتریکی محوری کاواک شتاب‌دهنده است. کد استرا با استفاده از اندازه‌ی میدان الکتریکی محوری کاواک، سایر میدان‌های الکترومغناطیسی را محاسبه می‌کند. به این منظور، میدان الکتریکی محوری به دست آمده با نرم‌افزار کامسول، به فرمت سازگار با کد استرا به صورت فایل داده‌ی ورودی در نظر گرفته می‌شود. به منظور تبدیل داده‌های خروجی نرم‌افزار کامسول به فرمت سازگار با کد استرا، از نرم‌افزار متلب<sup>(۱۰)</sup> [۱۸] استفاده شد.

از آن‌جا که براساس طراحی، لامپ مگنترون برای تأمین توان کاواک مورد نظر [۱۹] انتخاب شده است، در شبیه‌سازی نیز

ی دینامیک باریکه قبل از ساخت کاواک، شبیه‌سازی رفتار باریکه در برهم‌کنش با میدان‌های الکترومغناطیسی است. اهمیت این مرحله شبیه‌سازی را می‌توان از جنبه‌های مختلف ارزیابی کرد که در ادامه به برخی از پراهمیت‌ترین آنها در شتاب‌دهنده‌های خطی اشاره می‌شود.

۱. طراحی الکترومغناطیسی براساس مشخصات ذره‌ی مرجع تک‌انرژی قرار گرفته روی محور انجام می‌شود، در حالی که در عمل باریکه‌ی ورودی، گستردگی مکانی و پهنای انرژی دارد. در نتیجه، بررسی دینامیک باریکه می‌تواند دید کلی نسبت به کل ذرات باریکه را در اختیار قرار دهد.

۲. شاید در ساختارهای متقارن و متناوب، بررسی دینامیک باریکه و تخمین رفتار آنها راحت‌تر باشد، اما در ساختارهای غیرمتناوب (مانند بانچر) و در ساختارهای غیرمتقارن (مانند ساختارهای جفت‌شده‌ی جانبی) عدم یکنواختی میدان در کل ساختار، تخمین رفتار باریکه‌ی عبوری را مشکل، و در برخی موارد غیر قابل پیش‌بینی می‌سازد.

۳. تنها با طراحی الکترومغناطیسی مشخصات دقیق باریکه‌ی خروجی مانند پهنای انرژی، گسیلندگی، نیم‌رخ<sup>(۷)</sup> طولی و عرضی و سایر مشخصات حاصل نمی‌شود.

۴. برای تخمین تابش زمینه و اتلاف باریکه، مطالعه‌ی دینامیک دقیق باریکه، گریزناپذیر خواهد بود.

با توجه به موارد ذکر شده، بررسی دینامیک باریکه به منظور طراحی بهینه، یکی از مراحل حائز اهمیت در طراحی کاواک‌های شتاب‌دهی است. کد پارملا<sup>(۸)</sup> [۹] و استرا<sup>(۹)</sup> [۱۰] از کدهای رایج در این زمینه‌اند که اعتبارسنجی آنها در برخی از گزارش‌ها به چاپ رسیده [۱۱-۱۶]، و حتی اعتبارسنجی کدهای جدیدتر با این دو کد انجام شده است.

پس از شبیه‌سازی دینامیک باریکه‌ی درون ساختار، طراحی مکانیکی آن به لحاظ بررسی تنش حرارتی، ملاحظات ساخت و خنک‌کاری ساختار انجام می‌شود.

## ۱.۲ طراحی میدان الکترومغناطیسی کاواک

همان‌طور که اشاره شد، اولین مرحله‌ی طراحی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ساختار است که با توجه به پارامترهای مطلوب



بار فضایی ردیابی می‌کند. ردیابی ذرات براساس انتگرال Runge-Kutta درجه‌ی چهار با گام‌های زمانی مشخص انجام می‌شود [۲۰].

این کد شامل دو فایل ورودی اصلی است. در یکی از فایل‌ها باریکه‌ی ورودی برای ساختار تعریف، و ردیابی این باریکه در میدان‌های الکترومغناطیسی در فایل دیگر تعریف شده برای آن انجام می‌شود [۱۰].

بررسی دینامیک باریکه در هر شتاب‌دهنده را می‌توان به دینامیک عرضی و طولی تقسیم کرد. در دینامیک عرضی، ذرات خارج از محور شتاب‌دهی در نظر گرفته می‌شوند تا اثر نیروهای واگراکننده بر ذرات برآورد شود. در شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، به علت مسیر مستقیم الکترون‌ها و نسبتی شدن سریع آنها، محاسبات دینامیک باریکه‌ی عرضی ساده‌تر از این محاسبات در شتاب‌دهنده‌های دایره‌ای است [۲۱]. دینامیک طولی در اثر میدان‌های الکترومغناطیسی متناوب حاصل می‌شود. در شتاب‌دهنده‌ی خطی الکترون، بعد از تزریق باریکه و در ابتدای مسیر، الکترون‌ها نسبت به موج، فازهای متفاوتی دارند اما به سرعت به فاز نهایی می‌رسند و این فازها تا انرژی‌های بالا ثابت می‌مانند [۲۱].

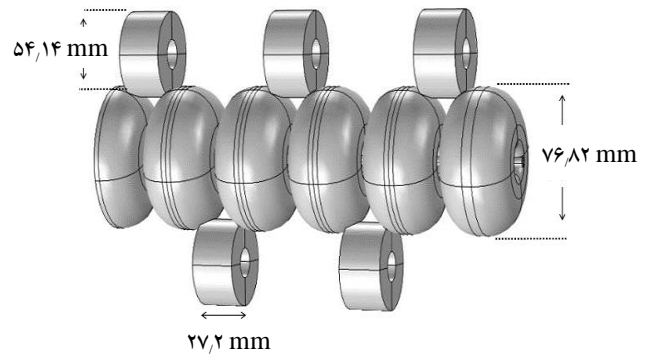
از آن‌جا که انرژی نهایی و بازدهی شتاب‌دهی کاواک ذرات، به میدان الکتریکی و فاز ثابت ذرات بستگی دارد، بررسی راندمان کاواک و انرژی نهایی ذرات، و هم‌چنین مطالعه‌ی دینامیک باریکه‌ی درون ساختار به منظور بررسی اتلاف باریکه اهمیت خواهد داشت. در بررسی دینامیک باریکه‌ی ذرات چندین پارامتر مهم خواهد بود که در ادامه معرفی مختصر آنها بیان شده است:

- **گسیلندگی باریکه:** معیاری است برای اندازه‌گیری متوسط گستردگی ذرات در مختصات فضای فاز که برای حالت تک‌ذره به صورت نمایش فضای فازی در طول مسیر، و برای حالت باریکه به صورت میانگین آماری ذرات در نظر گرفته، و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\varepsilon = \gamma(s)x'(s) + 2\alpha(s)x(s)x'(s) + \beta(s)x''(s) \quad (1)$$

که در آن  $\gamma$ ،  $\beta$  و  $\alpha$  پارامترهای Courant-Snyder هستند. گسیلندگی با واحد طول یا طول-زاویه تعریف می‌شود [۲۲].

بیشینه‌ی توان برابر با ۲٫۳ MW در فرکانس ۲۹۹۸٫۵ MHz مطابق با لامپ مذکور در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شکل کاواک.

جدول ۲. ابعاد هندسی کاواک شتاب‌دهی و کوپلینگ [۱۷]

مقدار (mm)	ابعاد هندسی کاواک‌های طراحی شده
۳۸٫۴۱	شعاع کاواک‌های شتاب‌دهی
۵۰	طول کاواک‌های شتاب‌دهی
۱۴٫۱۹	فاصله‌ی بین دماغه
۲٫۵	شعاع روزنه‌ی باریکه
۱۹٫۶	شعاع انحنا‌ی دیواره
۱	شعاع قسمت پایین دماغه
۲٫۷	شعاع قسمت بالای دماغه‌ی مخروطی
۵٫۳	شعاع بین دیواره و دماغه
۳	طول سطح مسطح
۲۲٫۵۷	شعاع کاواک‌های کوپلینگ
۲۷٫۲	طول کاواک‌های کوپلینگ
۹٫۶۱	طول دماغه‌ی کاواک‌های کوپلینگ
۸٫۳	شعاع دماغه‌ی کاواک‌های کوپلینگ

جدول ۳. پارامترهای الکترومغناطیسی کاواک طراحی شده [۱۷]

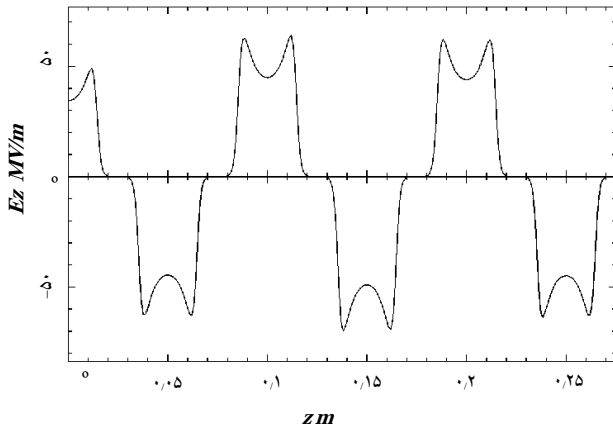
پارامتر	مقدار
ضریب کیفیت	۱۷۴۰۰
امپدانس موازی (MΩ/m)	۱۶۴٫۵۵
میدان سطحی بیشینه به میدان محوری	۳٫۸
گرادیان شتاب‌دهی (MV/m)	۲۱
فرکانس تشدید (MHz)	۲۹۹۸٫۵

### ۲.۲ بررسی دینامیک باریکه‌ی درون کاواک

کد استرا یک کد سه‌بعدی برای ردیابی ذرات به همراه یک مولد ذرات ورودی و چند کاربر گرافیکی پس پردازنده براساس کتابخانه PGPLOT است. این کد تعداد مشخصی ذره ( الکترون، پوزیترون، پروتون و یون هیدروژن) را تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی که توسط کاربر تعریف می‌شود با در نظر گرفتن



باریکه‌ی ورودی به کاواک است. گسیلندگی باریکه‌ی ورودی در صفحه‌ی عرضی با توجه به اندازه‌ی شعاع کاتد در تفنگ الکترونی برابر با ۴ mm و فاصله‌ی آن تا ابتدای کاواک حدود ۱ cm تخمین زده شده است. هم‌چنین گستردگی انرژی این باریکه حدود ۳ KeV تخمین زده شده است. در جدول ۴ مشخصات کلی باریکه تعریف شده به عنوان فایل ورودی نشان داده شده است.



شکل ۲. میدان الکتریکی تعریف شده در کد استرا

جدول ۴. مشخصات باریکه ورودی به کاواک

مقدار	پارامترهای باریکه ورودی
۴	اندازه‌ی باریکه در جهت افقی و عمودی (mm)
۳	گستردگی انرژی (KeV)
۰٫۳۲	سرعت نسبی ذره
۳۰۰	گسیلندگی باریکه در جهت طولی (mm)
۰٫۴۷	گسیلندگی نرمال شده در جهت افقی و عمودی (pi-mm-mrad)

### ۳. نتایج و بحث

در این شبیه‌سازی ۵۰۰۰ ذره در دو مرحله (در مرحله‌ی اول بدون، و در مرحله‌ی دوم با در نظر گرفتن اثر بار فضایی ذرات) ردیابی شدند. بدون در نظر گرفتن اثر بار فضایی ذرات، ۱۸۹۶ ذره، و با در نظر گرفتن آن، ۱۸۷۹ ذره به انتهای کاواک رسیدند. این تعداد برابر با بازدهی گیراندازی بیش از ۳۷٪ است و مقدار آن نسبت به بازدهی گیراندازی ارائه شده برای شتاب‌دهنده‌ی شرکت واریان مطلوب است.

در شکل ۳، نمودارهای فضای فاز باریکه در ابتدای کاواک، و در شکل ۴ نمودارهای فضای فاز در انتهای مسیر باریکه‌ی حاصل از ردیابی آن در میدان الکترومغناطیسی تعریف شده،

نیم‌رخ عرضی باریکه: نشان‌دهنده‌ی سطح مقطع باریکه است که این پارامتر برای شتاب‌دهنده‌های سینکروترون و برخورددهنده‌ها بسیار مهم است. در شتاب‌دهنده‌های خطی مورد استفاده در بازرسی محموله‌های کامیونی و پزشکی که از پرتو ایکس حاصل از برخورد الکترون با هدف استفاده می‌شود، لازم است اندازه‌ی باریکه، متناسب با قطر هدف باشد تا از داغ شدن بیش از حد مساحت کوچکی از هدف جلوگیری شود [۲۳].

انرژی نهایی باریکه و گستردگی انرژی: انرژی نهایی باریکه، متناسب با گرادیان شتاب‌دهی کاواک، انرژی اولیه‌ی ذرات، و طول کاواک مشخص می‌شود. در این مقاله، رسیدن به انرژی ۶ MeV مدنظر است. گستردگی انرژی، تأثیر

به‌سزایی در طراحی فیلتر مسطح‌کننده دارد و هر چه مقدار آن در خروجی کاواک کم‌تر باشد، رسیدن به گستردگی انرژی کم‌تر پس از فیلتر مسطح‌کننده راحت‌تر خواهد بود.

بازدهی گیراندازی: این پارامتر نشان‌دهنده‌ی مقدار جریان برخوردی به هدف نسبت به جریان خروجی تفنگ است. برای مثال بازدهی گیراندازی برای شتاب‌دهنده‌ی خطی مدل 600C/D شرکت واریان که از مدل‌های پر استفاده در پزشکی است ۳۷٪ گزارش شده است [۲۴].

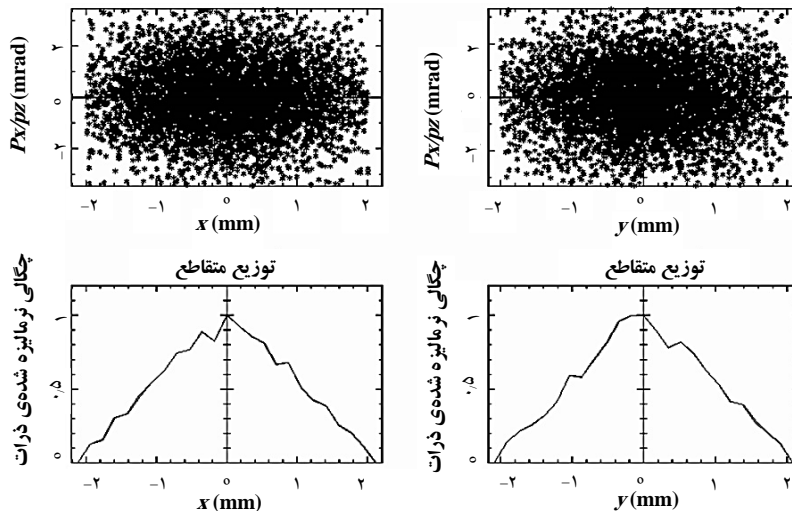
در شکل ۲، میدان الکتریکی محوری ورودی به دست آمده براساس طراحی کامسول و منطبق با کد استرا نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش میدان الکتریکی محوری در کد استرا تعریف شده است و کد استرا این قابلیت را دارد که سایر میدان‌های الکترومغناطیسی را درون کاواک محاسبه کند. با بررسی انجام شده روی میدان‌های الکتریکی کاواک شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول در فواصل مختلف از محور شتاب‌دهی، میدان‌های الکترومغناطیسی در محدوده‌ی روزنه‌ی عبور باریکه، از تقارن مطلوبی برخوردارند. بنابراین در نظر گرفتن میدان الکتریکی محوری به عنوان میدان کاواک، خللی در اعتبار نتایج خروجی کد ایجاد نمی‌کند.

تابع توزیع عرضی ذرات در فایل ورودی در دو جهت عمودی و افقی به صورت تابع گوسی، و در جهت طولی به صورت یکنواخت تعریف شده است که در عمل تخمین مناسبی از



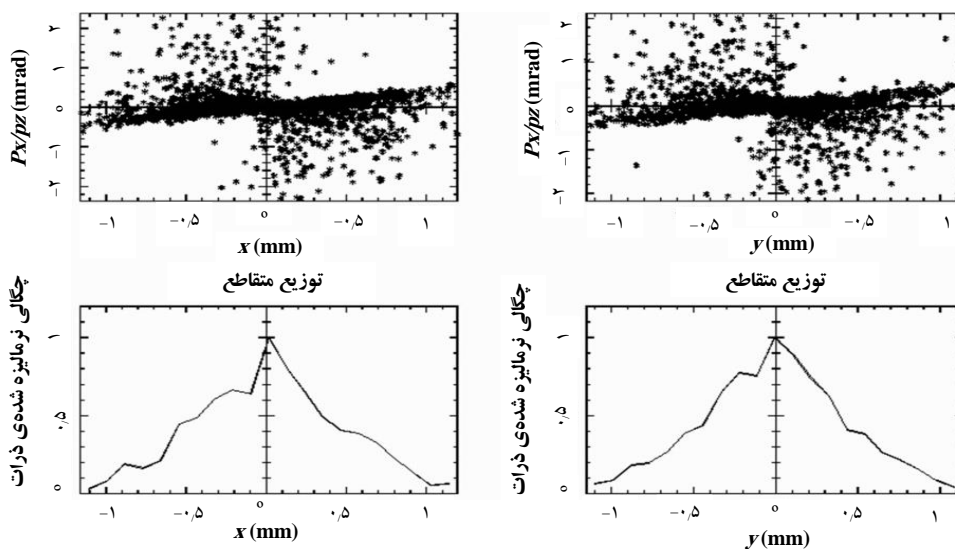
انتهای کاواک، گسیلندگی در جهت عمودی و افقی بدون در نظر گرفتن اثر بار فضایی  $3,55 \text{ pi-mm-mrad}$ ، و با در نظر گرفتن اثر بار فضایی  $4,18 \text{ pi-mm-mrad}$  است.

نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، باریکه در انتهای کاواک نیز توزیع گوسی خود را در راستای عمودی و افقی حفظ کرده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، شعاع باریکه در انتهای کاواک تقریباً نصف شعاع باریکه در ابتدای کاواک است. با توجه به نتایج به دست آمده در

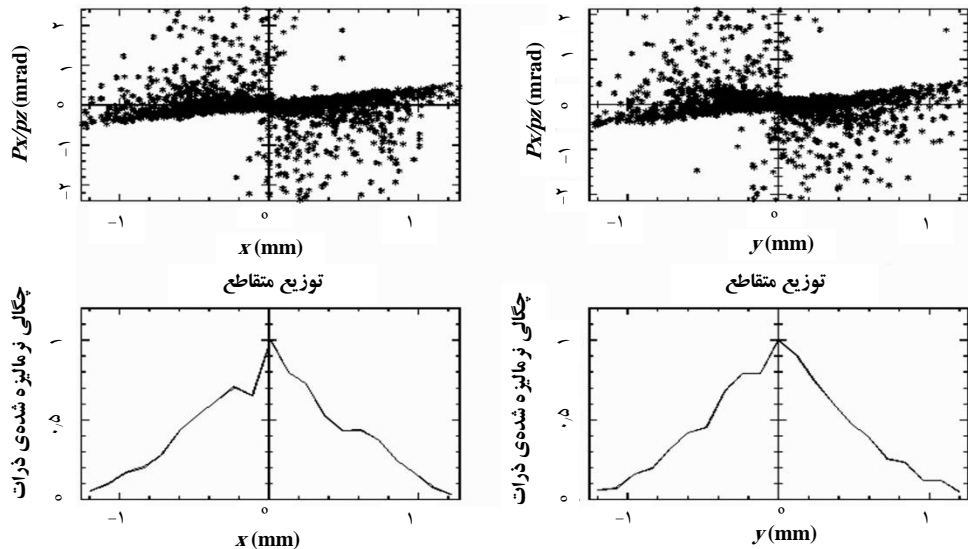


شکل ۳. فضای فاز باریکه در ابتدای کاواک.

(الف)



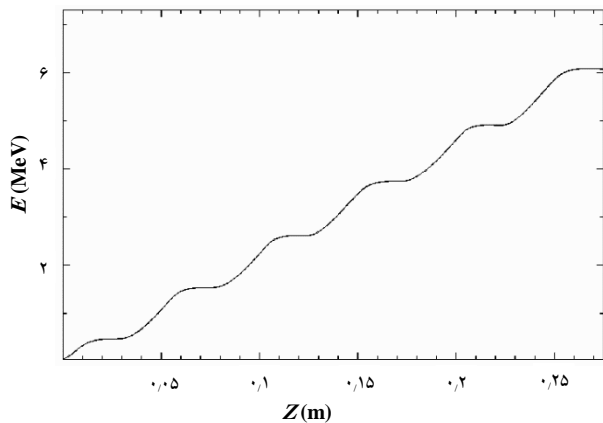
(ب)



شکل ۴. فضای فاز باریکه در انتهای کاواک: بدون در نظر گرفتن اثر بار فضایی ذرات (الف)، با در نظر گرفتن اثر بار فضایی ذرات (ب).

شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با پیشروی خوشه‌های الکترونی در طول کاواک، تغییرات اندازه حرکت در هر خوشه کاهش می‌یابد و در انتهای تیوب بیش‌ترین فشردگی باریکه مشاهده می‌شود.

شکل ۸، نمودار فضای فاز باریکه در صفحه‌ی عرضی باریکه‌ی ورودی (بالا)، فضای فاز باریکه خروجی بدون در نظر گرفتن اثر بار فضایی (وسط) و فضای فاز باریکه خروجی با در نظر گرفتن اثر بار فضایی (پایین) از کاواک را نشان می‌دهد. در شکل ۹ و ۱۰ نیز به ترتیب تغییرات گسیلندگی و تغییرات شعاع باریکه برای نقاط مختلف در طول کاواک نشان داده شده است.



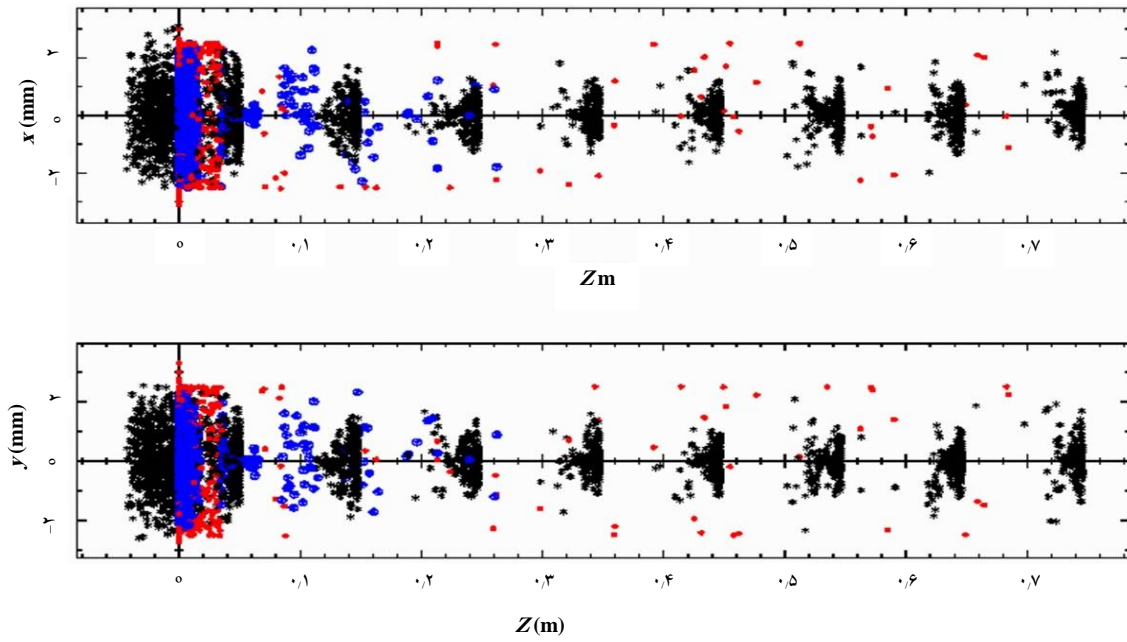
شکل ۵. تغییرات انرژی در راستای محور کاواک.

این نکته قابل ذکر است که با توجه به تصادفی بودن تولید باریکه‌ی ورودی در کد استرا، تابع توزیع باریکه‌ی ورودی کاملاً گوسی نخواهد بود.

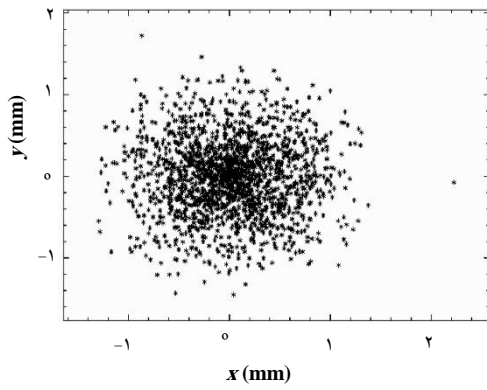
در شکل ۵، تغییرات انرژی برحسب طول کاواک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انتهای کاواک، انرژی ۶ MeV و هم‌چنین گستردگی انرژی ۰٫۸۸ MeV حاصل شده است. براساس مرجع [۲۵] که بررسی دینامیک باریکه‌ی کاواک شتاب‌دهی ۱۰ MeV موج ایستا را ارائه داده است، گستردگی انرژی کاواک طراحی شده در این مرجع ۱٫۰۷۶ MeV است. مقدار به دست آمده برای گستردگی انرژی برای کاربرد مورد نظر کافی است.

در شکل ۶، دینامیک باریکه‌ی طولی در طول کاواک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، باریکه‌ی ورودی با طول ۳۰ cm به خوشه‌های مجزا با فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری (برابر با فاصله‌ی مکانی دو کاواک هم‌فاز) تبدیل شده است.

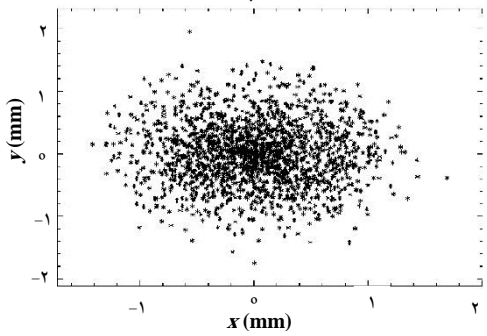
این نکته قابل ذکر است که پس از فاصله ۲۷٫۵ میلی‌متری (طول کاواک)، لوله‌ی رانش قرار داده شده است تا نمایش خوشه‌ها در خروجی قابل مشاهده باشد. در این شکل، نقاط آبی، ذراتی هستند که به سمت عقب شتاب داده شده‌اند، و نقاط قرمز رنگ ذراتی هستند که به دیواره‌های کاواک برخورد کرده‌اند. در شکل ۷ نیز فضای فاز طولی خوشه‌های الکترونی نشان داده



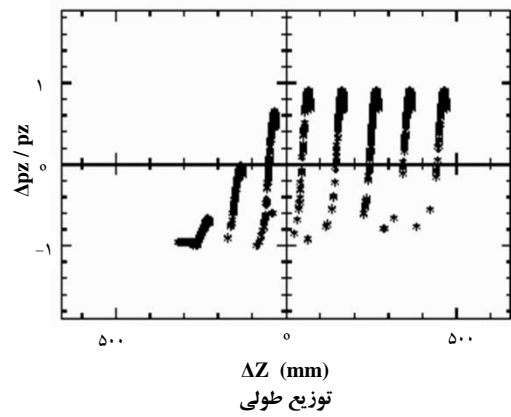
شکل ۶. دینامیک طولی باریکه در طول کاواک.



(پ)



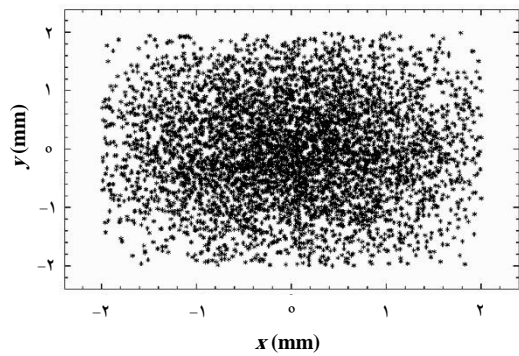
X (mm)



توزیع طولی

شکل ۷. فضای فاز طولی خوشه‌های الکترون در طول کاواک.

(الف)



(ب)

شکل ۸. فضای فاز باریکه در صفحه‌ی عرضی: باریکه‌ی ورودی (الف)، باریکه خروجی بدون اثر بار فضایی (ب) و باریکه خروجی با در نظر گرفتن اثر بار فضایی (پ).





شده از کد استرا و نتایج مراجع [۲۳-۲۵]، نتایج به دست آمده قابل قبول است.

**جدول ۵. مشخصات باریکه‌ی خروجی از کاواک**

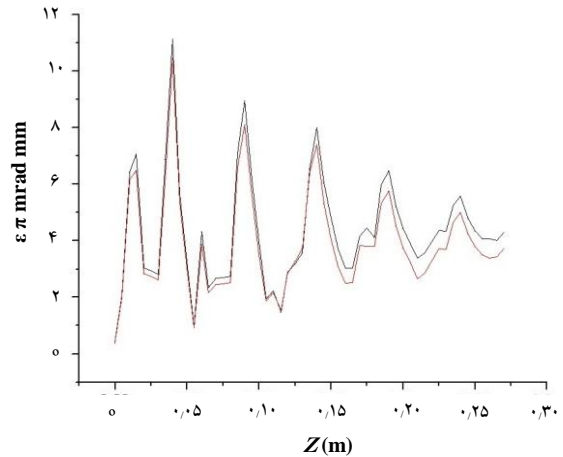
پارامترهای باریکه‌ی خروجی		بدون در نظر گرفتن	با در نظر گرفتن
		اثر بار فضایی	اثر بار فضایی
شعاع باریکه در جهت افقی و عمودی (mm)	۱,۱۱	۱,۲۵	
گسترده‌گی انرژی (MeV)	۰,۸۸	۰,۸۴	
سرعت نسبی ذره	۱	۱	
گسیلندگی باریکه (pi-mm-mrad)	۳,۵۵	۱,۱۸	

**۴. نتیجه‌گیری**

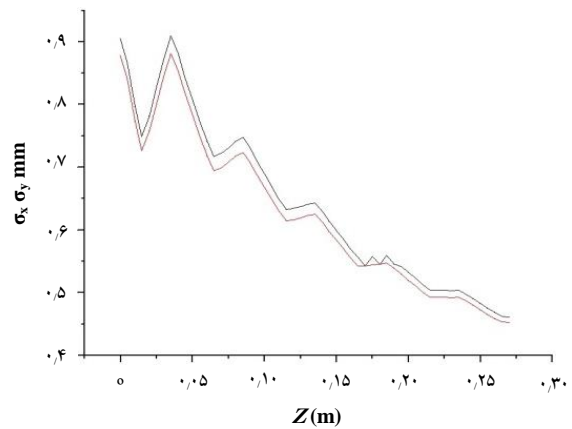
با شبیه‌سازی برهم‌کنش باریکه و میدان الکترومغناطیسی کاواک شتاب‌دهی طراحی شده در کد استرا، مشخصات باریکه‌ی خروجی به دست آمد. انتظار می‌رود پس از ساخت کاواک موردنظر، باریکه‌ای با نیم‌رخ عرضی ۱,۲۵ mm و گسترده‌گی انرژی ۰,۸۴MeV در انتهای کاواک وجود داشته باشد و ۳۷,۵٪ از الکترون‌های خروجی از تفنگ به هدف برخورد کنند. نتایج این مقاله برای طراحی هدف پرتو ایکس و طراحی سیستم خنک‌کاری هدف و کل کاواک قابل استفاده خواهد بود.

**پی‌نوشت‌ها**

1. Linac
2. Cargo Inspection
3. Poisson Superfish
4. Computer Simulation Technology(CST)
5. COMSOL Multiphysics
6. High Frequency Electromagnetic Field Simulation (HFSS)
7. Profile
8. Parmela
9. A Space Charge Tracking Algorithm(ASTRA)
10. MATLAB



شکل ۹. تغییرات گسیلندگی در طول کاواک.



شکل ۱۰. تغییرات شعاع باریکه‌ی ذرات در طول کاواک.

همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، توزیع ذرات باریکه‌ی خروجی در صفحه‌ی عرضی به تابع گوسی نزدیک بوده، و مطابق تصویر فضای فاز بیش‌ترین ذرات در وسط باریکه متمرکز شده است. با توجه به نتایج نمودار شکل ۱۰ و هم‌چنین نیم‌رخ نشان داده شده از باریکه‌ی خروجی در شکل ۸، شعاع باریکه‌ی ذرات بدون در نظر گرفتن اثر بار فضایی در راستای افقی و عمودی ۱,۱۱ mm و با در نظر گرفتن آن ۱,۲۵ mm به دست آمده است که این مقادیر براساس اندازه‌ی هدف ارائه شده در مرجع [۲۳] مناسب است.

گسترده‌ی فاز ورودی باریکه‌ی ورودی با توجه به در نظر گرفتن موقعیت باریکه و میدان RF در شبیه‌سازی انجام شده‌ی فازی بین ۹۰- تا ۶۰ درجه به انرژی نهایی مورد نظر خواهند رسید.

در جدول ۵ مشخصات باریکه‌ی خروجی از کاواک نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد، با مقایسه‌ی نتایج حاصل



[8] High Frequency Electromagnetic Field Simulation, <https://www.hfss.com>.

[9] LAACG, Parmela, (2017) [http://laacg.lanl.gov/laacg/services/serv\\_codes.phtml](http://laacg.lanl.gov/laacg/services/serv_codes.phtml).

[10] K. Floettmann, Astra, (1997) <http://www.desy.de/mpyflo/>.

[11] J.P. Carneiro, N. Barov, H. Edwards, M. Fitch, W. Hartungx, Transverse and Longitudinal Beam Dynamics Studies at the Fermilab Photoinjector, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. **8** (2005) 040101-1-7.

[12] R. Dash, J. Mondal, A. Sharma, K.C. Mittala, Beam Dynamics Studies and Parametric Characterization of a Standing Wave Electron Linac, *Jinst*. **8** (2013).

[13] Yasser Nour, Tamer Abuelfadl, PTCC: New Beam Dynamics Design Code for Linear Accelerators, IPAC2013, China (2013).

[14] Jean-Paul Carneiro, Benchmarking of Simulation Codes Track and ASTRA for the FNAL High-Intensity Proton Source, LINAC2006, Tennessee USA, (2006).

[15] J.F. Schmerge, P.R. Bolton, J.E. Clendenin, F.J. Decker, D.H. Dowell, S.M. Gierman, C.G. Limborg, B.F. Murphy, Transverse-emittance Measurements on an S-band Photocathode RF Electron Gun, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **483** (2002) 301–304.

[16] R.J. England, J.B. Rosenzweig, G. Travish, Generation and Measurement of Relativistic Electron Bunches Characterized by a Linearly Ramped Current Profile, *Phys. Rev. Lett.* (2008) 214802.

[17] S. Zarei, F. Abbasi Davani, M. Lamehi Rachti, F. Ghasemi, S. Ahmadian Namini, Design of Cavities of a Standing Wave Accelerating Tube for a 6 MeV Electron Linear Accelerator, IRANPAC2016, Tehran (2016) (In Persian).

[18] MATLAB, <http://www.mathworks.com>.

[19] Teledyne e2v, Magnetrons, (2017) <https://www.e2v.com/products/rf-power/magnetrons/>.

## مراجع

[1] F. Ghasemi, Design and Construction of Electron Linear Accelerator TW-tube and Measurement of its Parameters, PhD. Thesis, Shahid Beheshti University (2015).

[2] C.J. Karzmark, Craig S. Nunan, Eiji Tanabe, Medical Electron Accelerator, Mcgraw-hill inc. (1993) 5-6.

[3] Chuanxiang Tang, Huaibi Chen, Yaohong Liu, Electron Linacs for Cargo Inspection and Other Industrial Applications, IAEA, Austria (2009).

[4] R. Wegner, F. Gerigk, A Comparison of  $\pi/2$ -mode Standing Wave Structures for Linac 4, CERN Note (2006).

[5] Poisson Superfish, [http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download\\_sf.phtml](http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml).

[6] CST - Computer Simulation Technology, (2017) <https://www.cst.com>.

[7] COMSOL, (2017) <https://www.comsol.com>.

[20] K. Floettmann, S.M. Lidia, P. Piot, Recent Improvements to the ASTRA Particle Tracking Code, IPAC2003, Oregon U.S.A. (2003).

[21] Thomas P. Wangler, RF Linear Accelerators, Second Edition, WILEY-VCH&Co. kGaA, (2008).

[22] Klaus Wille, The Physics of Particle Accelerators; An Introduction, oxford university press, (2000).

[23] J. Bigolas, S. Getka, A. Kucharczyk, S. Kulinski, W. Maciszewski, M. Pachan, E. Plawski, Variable Energy (6-15) MeV Electron Linac for Medical Applications, IAEA, **34** (2003) 366-236.

[24] J.S. Aubin, Three Dimensional Simulation and Magnetic Decoupling of the Linac in a Linac-MR System, PhD. Thesis, University of Alberta, (2010).

[25] R. Dash, Beam Dynamics Studies of a 10 MeV Standing Wave Electron Linac, *IEEE Electrical Insulation*. **30** (2014) 609-612.



