

# طرح ساخت شتابگر خطی

محمد لامعی رشتی\*

قرار می‌گیرد. از آنجا که نیروی حاصل از میدان مغناطیسی بر سرعت و تکانه ذره عمود است، تنها میدان الکتریکی بر افزایش تکانه ذره مؤثر است و نقشی در شتاب ذره دارد. بنابراین برای شتاب ذرات باید آن‌ها را تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار داد. اولین شتابگرهای ذرات با استفاده از میدان‌های الکتریکی ثابت DC (شتابگرهای الکترواستاتیک) ساخته شدند. اما استفاده از اختلاف پتانسیل ثابت برای شتاب دادن ذرات به سرعت با محدودیت مواجه شد. ایجاد اختلاف پتانسیل‌های بزرگ، از چندین مگاولت به بالا، به دلیل تخلیه‌های الکتریکی ناخواسته، دشوار و ایجاد اختلاف پتانسیل‌های بزرگتر از چندین ده مگاولت عملاً غیر ممکن است. برای رفع نیاز به ذراتی با انرژی‌های بیشتر در تحقیقات (و کاربردهای) فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی، استفاده از میدان متناوب برای شتاب دادن به ذرات مطرح شد. برای این منظور کافی است که ذره باردار در نیم‌دوره‌های تناوب مثبت تحت اثر میدان الکتریکی قرار گیرد و در نیم دوره تناوب منفی از اثر میدان الکتریکی محفوظ نگه داشته شود. طبق این تفکر، شتابگرهایی مانند سیکلوترون و شتابگر خطی Wideröe برای یون‌های سنگین طراحی و ساخته شد. با توجه به اینکه جرم الکترون کوچک ( $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ ) است و به سرعت نسبی می‌شود استفاده از سیکلوترون یا شتابگر خطی Wideröe امکان‌پذیر نیست. پیشنهاد دیگر در مورد شتاب دادن الکترون استفاده از میدان الکتریکی موج الکترومغناطیس بود. چنانچه سرعت فاز موج برابر سرعت الکترون باشد، الکترون در مسیر حرکت خود مرتباً تحت اثر میدان الکتریکی ثابتی قرار خواهد گرفت و انرژی جنبشی آن زیاد خواهد شد. مشکل اصلی در این شتابگر این است که سرعت فاز موج الکترومغناطیس در یک موجبر ساده بزرگتر از سرعت نور است. بنابراین لازم است که ساختار موجبر به نوعی تغییر یابد که سرعت فاز موج الکترومغناطیس در آن کمتر (یا مساوی) سرعت نور شود. با قرار دادن صفحات سوراخدار در موجبر استوانه‌ای می‌توان به این مهم دست یافت. ساخت این نوع شتابگر خطی در سال‌های پس از جنگ دوم جهانی گسترش زیادی یافت: از سویی تکامل فناوری رادار در دوران جنگ جهانی دوم دسترسی به منابع قوی تولید امواج الکترومغناطیس را ممکن کرد و از سوی دیگر اولویت پژوهش در زمینه ذرات بنیادی و فیزیک هسته‌ای، ساخت شتابگرهای خطی را در دستور کار قرار داد. مقالات متعدد علمی در این دوران به جزئیات طراحی این شتابگرها می‌پردازند. به طور خلاصه می‌توان گفت که شتابگرهای خطی الکترون دارای سه بخش عمده هستند:

- اول، تفنگ الکترونی که الکترون‌ها در آن تولید می‌شوند و تحت تأثیر یک پتانسیل DC قرار می‌گیرند و دارای انرژی اندکی (۴۵ keV در شتابگر ما) می‌شوند.



طرح پژوهشی ساخت شتابگر خطی یکی از مهمترین طرح‌هایی است که پژوهشکده فیزیک پژوهشگاه دانش‌های بنیادی عهده‌دار اجرای آن است. این مقاله به جوانب مختلف این طرح می‌پردازد.

## مقدمه

هدف از طرح ساخت شتابگر خطی، ورود به عرصه‌ای از فناوری است که هر چند در جهان سابقه‌ای بیشتر از ۷۰ سال دارد، در کشور ما عملاً ناشناخته باقی مانده است. البته در سال‌های گذشته چندین شتابگر در ایران نصب شده‌بودند که به تولید رادیوایزوتوپ پزشکی و انجام تحقیقات در زمینه فیزیک هسته‌ای و اتمی می‌پرداختند. اما در سال‌های اخیر نصب شتابگرها، به خصوص شتابگرهای الکترون، در کشور گسترش یافت: در یزد شتابگر رودوترون (Rodotron) برای سترون کردن محصولات یکبار مصرف پزشکی و کاربردهای پرتوآوری پلیمرها نصب شد و در بیمارستان‌های مختلف کشور شتابگرهای متعدد خطی به منظور پرتودرمانی به کار گرفته شدند. برحسب برآوردهای مراکز بیمارستانی، با توجه به جمعیت کشور، ایران نیازمند بیش از صد شتابگر خطی در سال‌های آینده خواهد بود. از سوی دیگر کشور ایران در دو طرح بزرگ بین‌المللی مشارکت دارد: یکی طرح CMS است که در مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا (CERN) اجرا می‌شود و همکاران ایرانی چه در زمینه ساخت قطعاتی از این آشکارساز عظیم و چه در زمینه استفاده از آن شرکت خواهند کرد، و همچنین در طرح سزامی، حلقه انبارش سنکروترون که به صورت آزمایشگاهی بین‌المللی در اردن نصب خواهد شد، کشور ما عضو است و تعدادی از مهندسان جوان ایرانی در طراحی شتابگر شرکت دارند و کاربران ایرانی هم آموزش‌های لازم را می‌بینند تا از این دستگاه استفاده کنند. بنابراین هم کاربردهای پزشکی-صنعتی و هم پژوهش‌های علمی، سرمایه‌گذاری در زمینه شتابگرها را ضروری می‌کند. طرح ساخت شتابگر خطی در راستای آشنایی با فناوری ساخت شتابگرهاست.

## شتابگر خطی الکترون چیست؟

ذره‌ای با بار الکتریکی  $q$ ، سرعت  $\vec{v}$  و تکانه خطی  $\vec{p} = m\vec{v}$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  و میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  تحت تأثیر نیروی

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

## تأسیس آزمایشگاه در دانشگاه صنعتی اصفهان

از آنجا که طرح ساخت شتابگر خطی طرحی تجربی است، لازم بود که آزمایشگاهی برای ساخت، تست و اندازه‌گیری‌های مربوط به آن دایر شود. به این منظور فضایی در دانشگاه صنعتی اصفهان در اختیار این طرح قرار گرفت و فهرست وسایل اولیه لازم برای این طرح توسط مجریان تهیه شد و این وسایل توسط شهرک از محل بودجه طرح خریداری شدند و در آن آزمایشگاه قرار گرفتند. این وسایل شامل وسایل دفتری (میز، صندلی، فایل، کابینت، وسایل مختلف دیگر)، دو کامپیوتر مجهز برای انجام محاسبات، وسایل الکترونیک اندازه‌گیری مانند اهم متر، منبع تغذیه، اسیلوسکوپ و نوسانگر، ابزارهای مکانیکی مانند انواع آچارها، انبرهای مختلف و سایر ابزارهای مورد نیاز بودند. همچنین تغییرات لازم در تأسیسات این آزمایشگاه ایجاد شد تا بتوان به صورت مؤثر از آن استفاده کرد.

در شتابگرهای ذرات، ذرات در خلأ حرکت می‌کنند و در آن محیط تحت تأثیر میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. بنابراین لازم است وسایل خلأ سازی و خلأسنجی مناسب برای شتابگر تهیه شود. به این منظور یک ایستگاه کامل پمپ توربومولکولار، دو پمپ خلأ مکانیکی، دو پمپ توربومولکولار، چند شیر مختلف خلأ و دستگاه‌های خلأ سنج متفاوت خریداری شدند و در آزمایشگاه قرار گرفتند.

برای تست قطعات کاواک شتابگر لازم است که وسایل اندازه‌گیری فرکانس بالا در آزمایشگاه موجود باشد. به این منظور یک ژنراتور فرکانس بالا و یک اسپکتروم آنالیزر فرکانس بالا که قابلیت اندازه‌گیری در محدوده فرکانس شتابگر خطی را دارد خریداری شدند. هر دو دستگاه ساخت کارخانه HP هستند چون این‌گونه دستگاه‌ها بسیار گرانقیمت‌اند به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها، دستگاه‌ها به صورت دست دوم (با تضمین یکساله) انتخاب شدند.

## تجهیز کتابخانه و تهیه مقالات و نرم‌افزارهای محاسباتی

با توسعه شتابگرهای ذرات کتاب‌ها و مقالات فراوانی درباره آنها نوشته شده است. بیشتر کتاب‌ها و مقالات جدید به تحولات جدید فناوری و فیزیک این شتابگرها پرداخته‌اند و کمتر به جزئیات مورد نیاز ما در مرحله ساخت توجه کرده‌اند. از این رو کوشش ویژه‌ای در جهت دستیابی به کتاب‌ها و مقالات قدیمی صورت گرفت. خوشبختانه در کتابخانه مرکز اطلاعات هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، کتاب ذی‌قیمتی با عنوان Linear Accelerator نوشته Septier که در اواخر دهه ۷۰ میلادی نوشته شده موجود بود که بسیاری از اطلاعات مورد نیاز ما را در برداشت. همچنین تعداد دیگری از کتاب‌های جدید نیز در آن کتابخانه و همچنین در دیگر کتابخانه‌های کشور موجود بودند. همه این کتاب‌ها و کتاب‌های دیگر مورد نیاز در طرح شتابگر تکثیر شدند تا در تهران و اصفهان در اختیار مجریان و همکاران طرح قرار گیرند. همچنین چندین مقاله و گزارش اساسی که مربوط به ساخت شتابگر

- دوم، منبع موج الکترومغناطیس که امواج الکترومغناطیس با طول موج مناسب (فرکانس تقریباً ۳ GHz) و توان کافی برای شتاب دادن به الکترون‌ها ایجاد کند.
- سوم، موجبری که موج الکترومغناطیس در آن منتشر می‌شود و الکترون‌ها با عبور از آن تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند و به انرژی زیادتری می‌رسند.

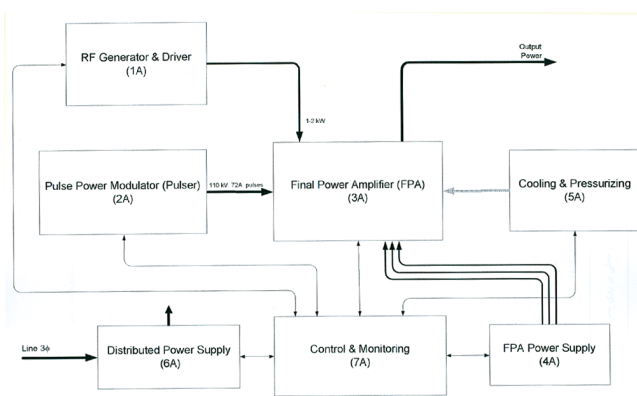
البته شتابگر الکترون دارای قسمت‌های مهم دیگری نیز هست که گرچه ساخت آنها مشکلات فنی زیادی ندارد، اما در هر صورت طراحی و ساخت آنها برای کار شتابگر خطی الزامی است.

## ساختار اداری طرح پژوهشی ساخت شتابگر

با تأیید طرح پژوهشی ساخت شتابگر خطی و اختصاص بودجه به آن، فعالیت‌های مربوط به مطالعه و ساخت این شتابگر آغاز شد. اجرای این طرح به عهده پژوهشکده فیزیک پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM) گذاشته شده است و با توجه به آنچه در مقدمه این گزارش آمده است بخشی از برنامه‌های وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری برای گسترش دانش شتابگرها و ورود به این شاخه از فناوری است. البته در کنار این بخش فنی، مسئله تربیت نیروی انسانی نیز مد نظر قرار گرفته و دوره آموزش دکتری این رشته در کشور تأسیس شده است: در حال حاضر چند دانشجوی دوره دکتری در این دوره به تحصیل اشتغال دارند. برای اجرای طرح، دفتری در پژوهشکده فیزیک پژوهشگاه به این امر اختصاص یافت و بخش عمده‌ای از کارهای اداری و نامه‌نگاری‌های مربوط در این دفتر انجام می‌شود. بخشی از بودجه سال ۱۳۸۱ طرح و تمامی بودجه سال‌های بعد، از طریق پژوهشگاه در اختیار مجری طرح قرار گرفت. با توجه به محدودیت‌هایی که در هزینه کردن این بودجه وجود داشت، از این بودجه عمدتاً برای عقد قراردادهای نیروی انسانی و همچنین قرارداد مطالعاتی منبع تولید امواج الکترومغناطیس استفاده شد.

چون محل اجرای طرح در شهرک علمی-تحقیقاتی اصفهان تصویب شده بود، لازم بود که آزمایشگاه مناسبی در اصفهان دایر شود تا بتوان کار عملی ساخت شتابگر را آغاز کرد. با توجه به آماده نبودن ساختمان اصلی شهرک که در مجاورت دانشگاه صنعتی اصفهان در دست ساختمان بود، تصمیم گرفته شد که آزمایشگاهی به طور موقت در دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان دایر شود تا بتوان کار ساخت شتابگر را پیش برد. بخشی از بودجه طرح برای سال ۱۳۸۱ به شهرک علمی-تحقیقاتی اصفهان داده شد تا در اختیار مجری قرار گیرد. با توجه به اینکه نیازهای مربوط به تجهیز آزمایشگاه بسیار زیاد بود تصمیم گرفته شد که از این اعتبار در جهت تجهیز اولیه آزمایشگاه استفاده شود و تدارکات لازم برای اجرای پروژه فراهم شود.

دوم اینکه این منبع تولید امواج باید به اندازه کافی پرقدرت باشد تا میدان‌های الکتریکی لازم برای شتاب ذرات را فراهم سازد: میدان‌های الکتریکی مورد نیاز در حدود  $10^6 - 5$  MV/m به منبع تولید امواج الکترومغناطیس قوی دارد و در نتیجه بهتر بود که افرادی به همکاری دعوت شوند که در این زمینه تجربه داشته باشند. به این منظور با پژوهشگاه برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان (که بعداً به پژوهشگاه فناوری اطلاعات تغییر نام یافت) قراردادی جهت مطالعه و طراحی منبع تغذیه، و سپس برای ساخت مولد امواج RF تا توان 2 kW بسته شد. قرارداد ساخت تقویت کننده نهایی (2 MW) پس از تحویل مولد 2 kW بسته خواهد شد. در شکل ۱ طرحواره این مولد و بخش‌های مختلف آن نشان داده شده است.



شکل ۱

## تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی چشمه مولد الکترون‌ها برای شتابگر است. ساخت تفنگ الکترونی خود به تنهایی طرح مستقلی است که باید اجرا شود، اما در اینجا ما از قطعات یک تفنگ الکترونی که قبلاً در شتابگر رودترون یزد (مرکز پرتو فرآوری یزد) به کار رفته بود، استفاده کردیم. این قطعات را در شکل ۲ نشان داده‌ایم. قطعات ناقص این تفنگ الکترونی ساخته شده و برای تست اولیه آماده شده است.



شکل ۲

SLAC III و SLAC II در سال‌های دهه ۵۰ میلادی بودند تهیه شدند: این مقالات و گزارش‌ها حاوی جزئیات فراوانی راجع به ریزه‌کاری‌های فنی و علمی هستند که بسیار مفیدند.

دوره‌های مدرسه شتابگر سرن (CERN Accelerator School) منبع ذی‌قیمت دیگری بودند که بسیار مورد استفاده قرار گرفتند. برخی از این دوره‌ها بیشتر به جنبه‌های فنی و فناوری شتابگرها می‌پردازند: دروس این دوره‌ها از طریق اینترنت به کامپیوترهای طرح شتابگر منتقل شدند و در اختیار همکاران طرح قرار گرفتند. به منظور جمع‌آوری سایر مدارک و مراجع مربوط به شتابگر که در شبکه اینترنت موجود بودند، به کمک یکی از دانشجویان همکار طرح، یک صفحه وب که مرتبط با سایت‌های مربوط به این موضوع است طراحی شد و با عنوان Accelerator Database در اختیار همکاران طرح شتابگر قرار گرفت.

نرم‌افزار مطلوب برای محاسبه ساختارهای شتابگر، نرم‌افزاری است با نام Mafia که محاسبات مربوط به کاواک شتابگر را در سه بعد انجام می‌دهد. متأسفانه این نرم‌افزار در دسترس ما نبود و خرید آن هم با توجه به منشأ آمریکایی این نرم‌افزار ممکن نیست. بنابراین برای محاسبات از نرم‌افزاری دوبعدی به نام Superfish استفاده شد. این نرم‌افزار روی کامپیوترهای طرح در تهران و اصفهان نصب شد و در هر دو محل برای انجام محاسبات به کار رفت. نتایج محاسبات این نرم‌افزار با محاسبات تحلیلی و همچنین با محاسبات مربوط به شتابگرهای دیگر مقایسه شد. به نظر می‌رسد که این نتایج قابل اعتماد باشند. در هر صورت تنها مقایسه با نتایج تجربی مسائل را روشن خواهد کرد.

## فعالیت‌های انجام شده در جهت ساخت شتابگر

در این بخش از گزارش به فعالیت‌های انجام شده در جهت ساخت قسمت‌های اصلی شتابگر می‌پردازیم. همان‌طور که در بالا گفته شد، در شتابگر خطی سه قسمت اساسی وجود دارد که عبارت‌اند از منبع تولید امواج الکترومغناطیس، موجبری که در آن امواج الکترومغناطیس منتشر می‌شوند و الکترون‌ها شتاب می‌گیرند و تفنگ الکترونی که الکترون‌ها در آن تولید می‌شوند. در جهت بررسی و ساخت این سه قسمت شتابگر خطی فعالیت‌هایی انجام شده است که در زیر به آنها اشاره می‌شود.

### منبع تولید امواج الکترومغناطیس با فرکانس 3 GHz

منبع تولید امواج الکترومغناطیس برای یک شتابگر خطی باید دارای این مشخصات باشد: نخست اینکه فرکانس نوسانی آن در محدوده مورد نیاز باشد که در شتابگر الکترون، معمولاً این فرکانس در حدود 3 GHz (باند S) است. البته شتابگرهای خطی الکترون در باند (10 GHz) هم ساخته شده است ولی این فرکانس بالاتر به مشکلات بیشتری در ساخت می‌انجامد. بنابراین فرکانس باند S، که در آن تجربه بیشتری وجود داشت انتخاب شد.

## مشخصات عمومی شتابگر

بنابر طراحی انجام شده و با توجه به توان منبع تولید امواج الکترومغناطیس، مشخصات عمومی شتابگر خطی در جدول زیر آمده است:

### مشخصات عمومی شتابگر خطی

۹ - ۱۲ MeV	انرژی الکترون‌ها
۲ MW پالسی	توان RF
۳٫۵ μs	مدت پالس
۲۹۹۸ MHz	فرکانس RF
۱۰۰ Hz	فرکانس تکرار
موج گذرا TM	نوع موج الکترومغناطیس
دیسک-استوانه	ساختار کاواک‌ها
π/۴	اختلاف فاز در دو کاواک متوالی
۲۱	تعداد کاواک‌های بانچر
(β = v/c = ۰٫۴۱ - ۰٫۹۹)	تعداد کاواک‌های شتابگر
۳۶	(β = ۱)
۱۵ MV/m	میدان الکتریکی در کاواک اول
۴٫۲ MV/m	میدان الکتریکی در کاواک آخر
در حدود ۱۰۰۰۰	ضریب کیفیت Q
ترمیونی	نوع تفنگ الکترونی
۴۵ keV	انرژی الکترون‌ها پس از خروج از تفنگ
۴ mA	شدت جریان

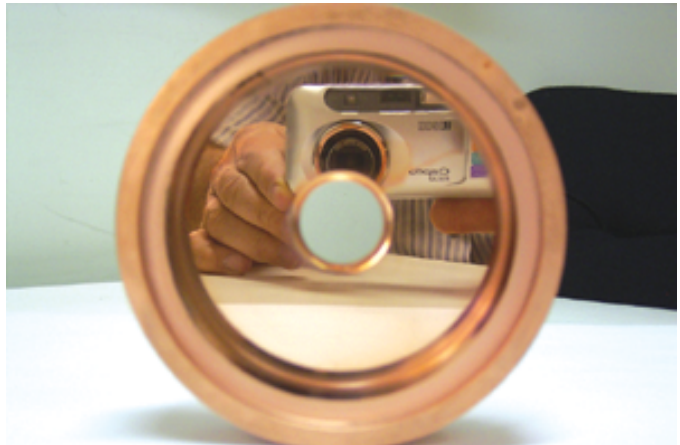
امید است که مراحل دیگر تست و ساخت این شتابگر با سرعت بیشتری ادامه یابد و بتوان اولین باریکه الکترون خروجی از این شتابگر را مشاهده و اندازه‌گیری کرد.

\*\*\*\*\*

\* محمد لامعی رشتی، سازمان انرژی اتمی ایران و پژوهشکده فیزیک.

## کاواک شتابگر

کاواک موجبر شتابگر دارای ساختار استوانه-دیسک و شامل ۵۷ سلول است. اندازه‌های کاواک به کمک نرم‌افزار Superfish برای فرکانس تشدید (۲۹۹۸ MHz) محاسبه شدند. کاواک شتابگر از دو بخش متفاوت تشکیل شده است: در قسمت انرژی کم که بلافاصله پس از تفنگ الکترونی قرار دارد، چون سرعت الکترون‌ها کم است، برای حفظ همزمانی حرکت الکترون‌ها با سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در کاواک، طول سلول‌ها متنظر با افزایش سرعت الکترون‌ها افزایش می‌یابد. این قسمت شتابگر «بانچر» (Buncher) نامیده می‌شود و شامل ۲۱ سلول است. در کاواک انرژی بالا همه سلول‌ها اندازه‌های یکسانی دارند. جنس کاواک‌ها باید از مس بسیار خالص باشد، تا اتلاف توان الکتریکی به حداقل برسد. جنس سلول‌ها (مس خالص)، دقت در ابعاد (چند میکرون) و صافی سطح داخلی سلول‌ها ساخت این کاواک را بسیار مشکل می‌کند. به منظور بررسی مشکلات ساخت و تصمیم‌گیری درباره آن، روش سوار کردن سلول‌ها و ساخت سلول کامل، نمونه‌هایی از این سلول‌ها ساخته شدند و آماده تست هستند. در شکل ۳ حالت سطح یکی از سلول‌ها و در شکل ۴ تعدادی از سلول‌ها که برای نمایش کنار هم قرار داده شده‌اند مشاهده می‌شوند.



شکل ۳



شکل ۴