مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۵، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، تابستان ۱۳۹۴
مقاله نامهٔ اولین کنفرانس ملی شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آن‌ها، آذر ۱۳۹۲

بررسی وضعیت شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون در درمان سرطان در ایران

مهناز منتظم[۱]، سیدربیع مهدوی[۲] و فرشاد قاسمی[۱]

۱. پژوهشکدهٔ فیزیک و شتاب‌گرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
۲. دانشکدهٔ پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران

چکیده

استفاده از شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، کاربردی‌ترین روش در پرتودرمانی[۱] سرطان‌ها محسوب می‌شود. هم‌اکنون حدود ۵۲ درصد از بیماران سرطانی از این روش در فرایند درمان خود استفاده می‌کنند. با این وجود، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه امکانات پرتودرمانی کافی وجود ندارد. به طوری‌که، در بررسی‌های اخیر در سطح جهان، کمبود پنج هزار سیستم پرتودرمانی مگاولتاژ گزارش شده است. طبق استانداردهای بین‌المللی برای هر ۱۸۰۰۰۰ نفر یک دستگاه شتاب‌دهنده خطی پزشکی مورد نیاز می‌باشد. در ایران، سرطان، سومین علت مرگ و میر پس از بیماری قلبی و عروقی و حوادث شناخته شده است. گزارش کمی از وضعیت ایران در زمینه تعداد شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون پزشکی از نتایج این مقاله است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، پرتودرمانی، سرطان

۱. مقدمه

معمولاً سرطان دومین عامل شایع مرگ و میر در کشورهای توسعه یافته و سومین عامل مرگ در کشورهای در حال توسعه است. با توجه به آمارهای موجود سازمان بهداشت جهانی، سرطان در کشورهای در حال توسعه هرسال رو به افزایش و بیشتر از ایدز، سل و مالاریا مردم را می‌کشد. آمارهای منتشره در آستانهٔ روز جهانی سرطان در سال ۲۰۰۹ بیش از ۱۲ میلیون مورد جدید سرطان در سراسر جهان را نشان می‌دهد، که به ۷/۶ میلیون مورد مرگ و میر می‌انجامد و این در حالی است که بیش از نیمی از همه موارد سرطان‌ها و حدود ۶۰ درصد موارد مرگ و میرهای ناشی از آن در کشورهای در حال توسعه، یعنی کشورهایی که زیربنای ضعیف پزشکی در آن‌ها اغلب به معنای آن است که سرطان حکم مرگ قطعی است، رخ می‌دهد. بر اساس این گزارش، که به وسیله بنیاد بهداشت و مشاوره Axios International منتشر شده است، تا سال ۲۰۳۰ ممکن است ۲۰ میلیون مورد جدید سرطان در هر سال تشخیص داده شود و ۱۳ میلیون مرگ و میر رخ دهد.

درمان سرطان شامل یک یا ترکیبی از روش‌های جراحی، پرتودرمانی، شیمی‌درمانی و ایمنوتراپی است [۱]. پرتودرمانی

۱. Radiotherapy

به عنوان یکی از مهمترین روش‌های معالجهٔ بسیاری از سرطان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از اثرات متقابل پرتوهای یون ساز با مواد و همچنین اثرات بیولوژیک آن‌ها برای کنترل و درمان بافت‌های سرطانی استفاده می شود. شدت و انرژی پرتوهای مورد استفاده در رادیوتراپی باید به حدی باشد که با استفاده از آن‌ها بتوان اثرات بیولوژیکی کاملاً مخرب به سلول‌های سرطانی وارد نمود. رادیوتراپی به طور کلی به دو طریق درمان کوتاه برد[۱] و درمان از راه دور[۲] انجام می‌گیرد [۲].

برکی‌تراپی: روشی است که در آن از یک منبع پرتوهای یون‌ساز (چشمه رادیو اکتیو یا منبع پرتو ایکس) برای درمان تومور از فاصله نزدیک استفاده می‌گردد. در این حالت دز به صورت پیوسته به بافت می‌رسد. مزیت فیزیکی براکی‌تراپی در مقایسه با پرتودرمانی از راه دور تحویل دز به صورت متمرکز شده به بافت مورد درمان است. از طرفی، این روش فقط می‌تواند در مواردی به کار رود که حجم بافت مورد درمان کوچک و مکان آن دقیقاً مشخص شده باشد [۲].

تله‌تراپی: دستگاه‌های استاندارد در تله‌تراپی مدرن عبارتند از: دستگاه کبالت-۶۰، شتاب‌دهنده‌های الکترونی و یونی. در ادامه این مقاله پس از مروری بر جایگاه شتاب‌دهنده خطی الکترون پزشکی در درمان سرطان و همچنین بررسی ساختار دستگاه‌های موجود، وضعیت این شتاب‌دهنده‌ها در درمان مبتلایان به سرطان در ایران مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. جایگاه شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون در درمان سرطان و تاریخچهٔ آن

کبالت-۶۰ مناسب‌ترین عنصر رادیواکتیو برای درمان خارجی است. از ابتدای دهه هفتاد با حرکت به سمت استفاده از شتاب‌دهنده‌های خطی و مزیت‌های آن‌ها از جمله اضافه شدن درمان با باریکهٔ الکترونی و طراحی درمان دقیق‌تر، ساخت و تحقیقات دستگاه کبالت کمتر شده است. امروزه تولید سیستم‌های کبالت-۶۰ در دنیا به چند شرکت منحصر می‌شود.

۱. Brachytherapy
۲. Teletherapy

این دستگاه‌ها از نظر کاربری و عدم پیچیدگی و سادگی در استفاده همچنان برای کشورهای در حال توسعه کاربرد دارد [۳]. شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، میکروترون‌ها و بتاترون‌ها دستگاه‌هایی هستند که می‌توانند باریکه‌های الکترونی در گستره ۵-۳۰MeV تولید کنند. از این شتاب‌دهنده‌ها می‌توان هم در مد الکترون و هم در مدایکس برای درمان استفاده کرد که البته مزایای شتاب‌دهنده‌های خطی نسبت به میکروترون‌ها و بتاترون‌ها استفاده از آن‌ها را بیشتر کرده است. امروزه در تله‌تراپی، برای درمان تومورهای قرار گرفته در نقاط حساس بدن که لازم است بافت‌های اطراف آن‌ها دز بسیار کمی را دریافت کنند، استفاده از روش‌هایی نظیر پروتون‌تراپی و هادرون‌تراپی پیشنهاد می‌شود. سیکلوترون و سینکروترون رایج‌ترین شتاب‌دهنده‌هایی هستند که برای این منظور استفاده می‌شوند. سیکلوترون‌ها معمولاً فقط برای پروتون مورد استفاده قرار می‌گیرند و شعاع باریکهٔ آن‌ها در حدود چند سانتی‌متر است. این روش بسیار موفقیت‌آمیز بوده است، با این وجود دستگاه‌های هادرون‌تراپی بسیار حجیم، بزرگ و گران‌قیمت است و تاکنون کشورهای اندکی نظیر روسیه، آمریکا، ژاپن و اروپا به این تکنیک مجهز هستند [۴]. هزینهٔ بسیار پایین تولید پرتوهای ایکس و الکترون با انرژی‌های مناسب نسبت به هادرون‌تراپی و نیز رفع نیاز انبوهی از بیماران باعث شده که شتاب‌دهنده‌های خطی موفق‌ترین سیستم در پرتودرمانی تومورهای سرطانی معرفی شوند. در جدول ۱ محدودهٔ انرژی لازم برای درمان تومورهای سرطانی به تفکیک ارگان مبتلا آورده شده است.

طی سال‌های متمادی روش‌های مختلفی برای بهبود درمان با دستگاه‌های شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون به‌کار برده شده است که مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها به ترتیب عبارتند از: CRT[۳]، DCRT۳[۴]، IMRT[۵] و IGRT[۶]. در جدیدترین روش‌های پرتودرمانی بالینی، بیش از نیمی از بیماران سرطانی با پرتودهی درمان می‌شوند و روز به روز با پیدایش فن‌آوری‌های مدرن‌تر این

۳. Conformal Radiation Therapy
۴. 3Dimensional Conformal Radiation Therapy
۴. Intensity Modulated Radiation Therapy
۵. Image Guide Radiation Therapy

جدول ۱. محدوده انرژی فوتون مناسب برای درمان ارگان‌های مبتلا به سرطان.

ارگان درگیر	^{60}Co	۴MV	۶ MV	۱۰ – ۱۵MV	> ۱۸ MV
مغز	←	→	→		
سر و گردن	←	→	→		
پستان	←	→	→		
ریه		→	→	→	
غدد لنفاوی		→	→	→	
لوزالمعده				←	←
روده و معده			→	→	
مثانه			→	→	
کولون و رکتوم			→	→	←
اطفال		→	→		
دستگاه تناسلی زنانه		→	→	→	
دستگاه تناسلی مردانه			→	→	
دستگاه عصبی مرکزی		→	→		
استخوان بالا تنه			→	→	
استخوان پایین تنه		→	→		
تیروئید	←	→	→		
سیستم خون ساز		→	→		
مری		→	→	→	
تخمدان		→	→	→	
پروستات		→	→	→	

رقم رو به افزایش خواهد بود. به همین دلیل، از قرن بیستم تاکنون، در راستای توسعه دستگاه‌های پرتودرمانی بهینه، تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای انجام گرفته است [۵].

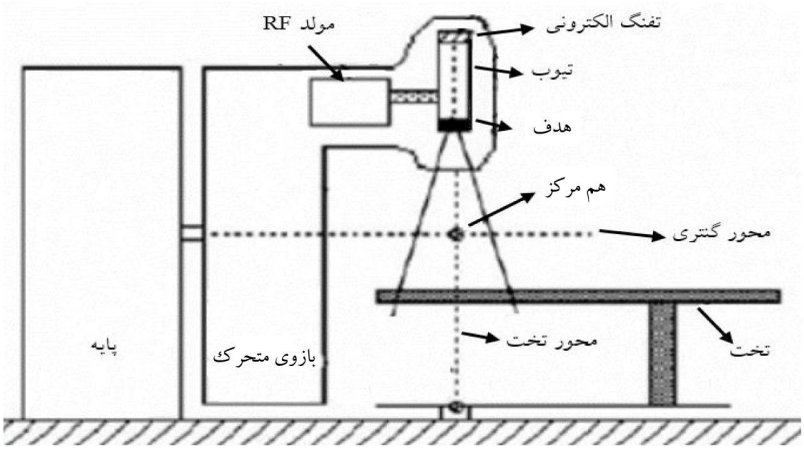
اولین شتاب‌دهندهٔ خطی پزشکی با قابلیت تولید پرتو ایکس ۸ مگاولتی در سال ۱۹۵۳ در بیمارستان هامرسمیس انگلستان نصب گردید. سپس در همان سال یک شتاب‌دهندهٔ ۴ مگا ولتی در دو بیمارستان کریستی و نیوکاسل نصب شد. شتاب‌دهندهٔ نصب شده در بیمارستان کریستی قابلیت دوران ۱۲۰ درجه را دارا بود. در سال ۱۹۵۶ یک شتاب‌دهندهٔ ۶ مگا ولت در استنفورد برای درمان اولین بیمار مورد استفاده قرار گرفت. نوع دیگری از شتاب‌دهندهٔ خطی ۶ مگا ولتی که قابلیت دوران ۳۶۰ درجه گنتری[۱] را دارا بود در مرکز پزشکی UCLA ساخته و اولین نمونه در مدرسهٔ پزشکی دانشگاه استنفورد در سال ۱۹۶۲ نصب شد. از آن زمان تا کنون شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی پیشرفت چشمگیری داشته‌اند. امروزه، مدل‌های مختلفی با قابلیت تولید باریکهٔ الکترونی خروجی با انرژی ۴ تا ۳۰ مگا الکترون ولت به‌طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند که از این شتاب‌دهنده‌ها می‌توان هم در مد الکترون و هم در مد ایکس برای درمان استفاده کرد.

۳. ساختار شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون پزشکی

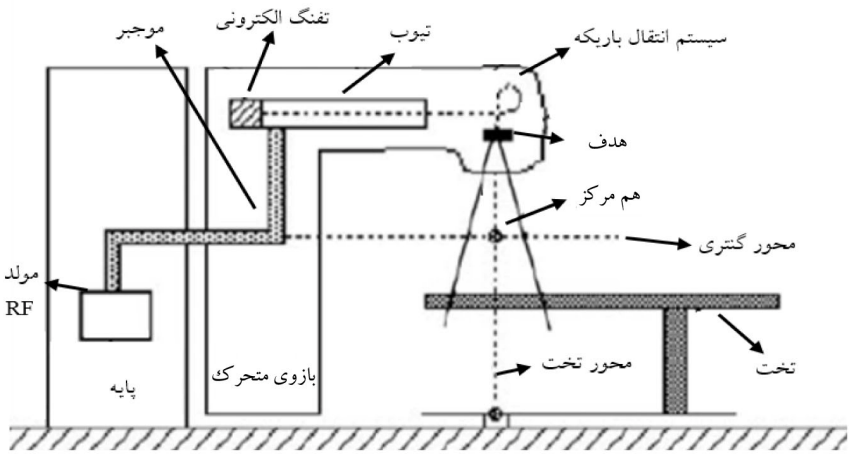
شتاب‌دهنده‌های خطی ، در واقع ساختارهای موجبری هستند که توان تولیدی توسط منابع تولید توان فرکانس رادیویی را به انرژی جنبشی الکترون‌ها، پروتون‌ها و یا ذرات دیگر تبدیل می‌کنند. این ساختارها در طرح‌های مختلفی طراحی می‌شوند که برحسب نوع ذره و انرژی، ساختار ویژه‌ای دارند. برای شتاب‌دهی به پروتون‌ها و یون‌های سبک از ساختارهای RFQ[۲]، DTL[۳]، SCDTL[۴] و یا SSC[۵] استفاده می‌شود که شکل کاواک‌ها و محدودهٔ انرژی مورد استفاده آن‌ها متفاوت است. برای شتاب‌دهنده‌های الکترونی، اغلب از دو ساختار موج ایستا (SW[۶]) و موج رونده (TW[۷]) استفاده می‌شود. اصول حاکم بر عملکرد

۱. Gantry

۲. Radio Frequency Quadrupole
۳. Drift Tube Linacs
۴. Side Coupled Drift Tube Linacs
۵. Standing Wave Side Coupled Linacs
۶. Standing Wave
۷. Traveling Wave



شکل ۱. طرح لینک‌های[۱] هم مرکز انرژی پایین که در آن‌ها موجبر شتاب‌دهی عمود بر تخت درمان است.



شکل ۲. طرح لینک‌های هم مرکز انرژی بالا که در آن‌ها موجبر شتاب‌دهی موازی با تخت درمان است.

این دو ساختار یکسان است. ولی تفاوت‌هایی اساسی در نحوه طراحی این ساختارها وجود دارد که برحسب نوع استفاده و پارامترهای مورد نظر از جمله جریان و دینامیک باریکه ذرات مطلوب خروجی، توان قابل دسترس، طول مجاز و برخی عوامل دیگر مشخص می‌شود.

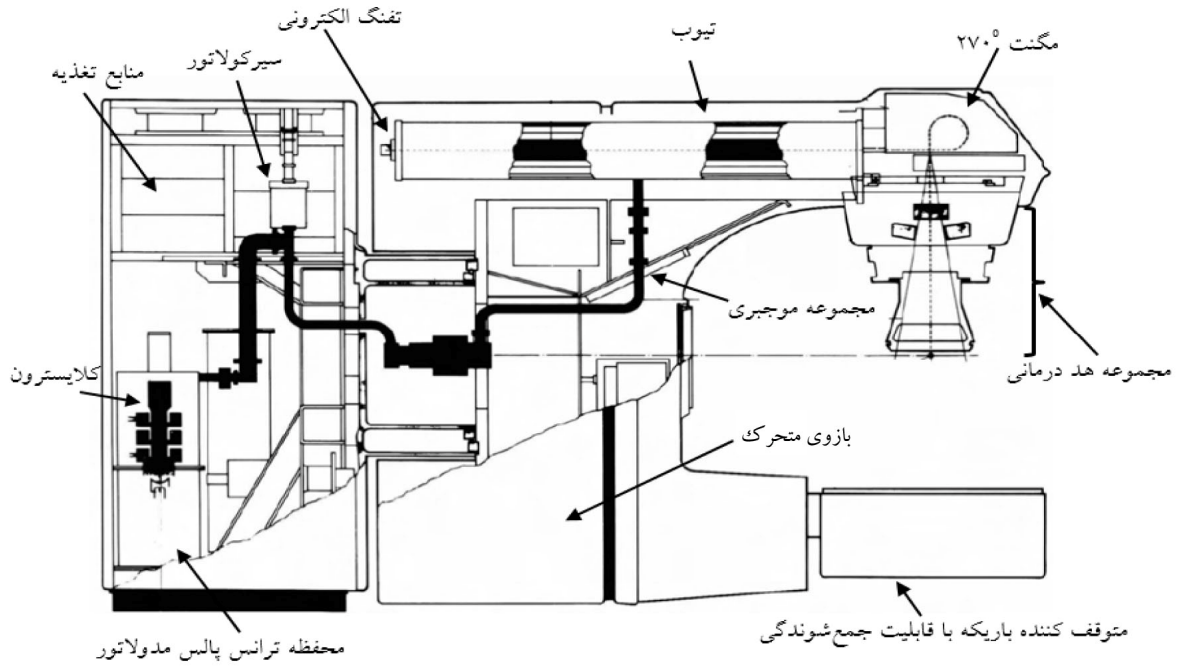
برای الکترون‌های در محدوده‌های انرژی مگا الکترون ولت، تابش فوتون‌های ترمزی ناشی از برخورد الکترون‌ها روی هدف، با بیشترین احتمال رو به جلو و در همان امتداد الکترون‌ها خواهد بود. در ساده‌ترین و پرکاربردترین ساختار شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی، تفنگ الکترونی و هدف[۲] تولید پرتو ایکس بخشی از موجبر شتاب‌دهی را تشکیل می‌دهند و تمام این سه جز بطور مستقیم با نقطهٔ هم مرکز لینک[۳] در یک راستا قرار می‌گیرند. در این طراحی به سیستم انتقال باریکه نیازی نیست. همچنین مولد تولید توان را می‌توان در داخل گنتری جاسازی نمود. متداول‌ترین نوع این ساختارها، شتاب‌دهنده‌های ۴ یا ۶ مگا ولتی هستند که تنها از باریکه فوتونی آن‌ها برای درمان استفاده می‌شود. شمای چنین ساختاری در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

تیوب شتاب‌دهی شتاب‌دهنده‌های ۸ تا ۳۰ مگا الکترون‌ولت که شمای کلی آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است دارای طولی بیشتر از مقدار در دسترس روی هد شتاب‌دهنده هستند. بنابراین نمی‌توان آن‌ها را به طور عمود بر نقطهٔ هم مرکز قرار داد و باید روی بازوی گنتری به‌طور افقی تعبیه شوند. برای این‌گونه

۱. Linac

۲. Target

۳. Linac Isocenter



شکل ۳. ساختار کلی شتاب‌دهندهٔ خطی پزشکی انرژی بالا **[۶]**.

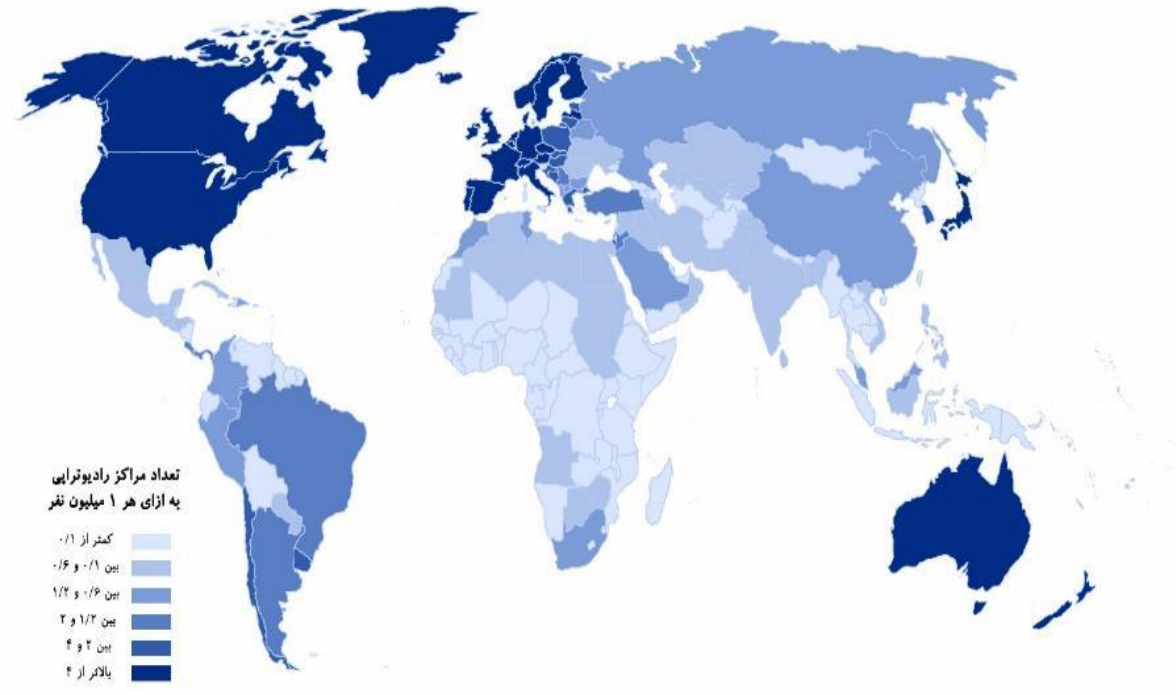
ساختارها سیستم انتقال باریکهٔ الکترونی از موجبر شتاب‌دهی تا هدف تولید پرتو ایکس ضروری است. برای هر دو ساختار، منبع تولید توان RF اغلب بر روی پایهٔ گنتری تعبیه می‌گردد.

اجزای کلی یک شتاب‌دهندهٔ خطی پزشکی انرژی بالا با جزئیات بیشتر در شکل ۳ آورده شده است. ۵ قسمت عمدهٔ دستگاه عبارتند از: مدولاتور[۱]، پایه[۲]، بازوی متحرک (گنتری)[۳]، کنسول و تخت درمان[۴]. بخش‌های مدولاتور و کنسول در شکل دیده نمی‌شوند. در برخی از شتاب‌دهنده‌ها مدولاتور در قسمت پایه قرار داده می‌شود (همانند ساختار شتاب‌دهنده‌های واریان[۵]). با وجود اینکه تخت درمان از اجزای درمانی دستگاه محسوب نمی‌شود ولی نقش مهمی در جهت‌گیری گنتری و طرز قرارگیری بیمار زیر دستگاه ایفا می‌کند. کنسول شتاب‌دهنده را می‌توان قلب شتاب‌دهنده خطی دانست چرا که تمامی بردهای مدار کنترلی و خازن‌های تیون کننده در این قسمت قرار می‌گیرند و عملکرد روزانهٔ دستگاه از کنسول کنترل می‌گردد. مدولاتور منبع تغذیه شتاب‌دهنده محسوب می‌شود و تبدیل کنندهٔ جریان تناوبی AC به جریان DC مورد نیاز اجزای پایه است.

در شتاب‌دهنده‌های انرژی بالا، کلایسترون[۶] درون پایهٔ شتاب‌دهنده است که وظیفهٔ تقویت اولیه امواج فرکانس رادیویی را برای شتاب دادن به الکترون‌ها بر عهده دارد. در شتاب‌دهنده‌های انرژی پایین، مگنترون وظیفه تأمین RF توان بالا را دارد و معمولاً در بازوی گنتری قرار می‌گیرد. مجراهای انتقال آب خنک کننده که برای خنک کردن تمامی اتصالات و همچنین هدف تولید کنندهٔ اشعهٔ X به کار می‌روند نیز در قسمت پایه تعبیه می‌شود. گاز هگزا فلوراید سولفور (SF_6) به عنوان عایق در موجبر[۷] تزریق می‌شود و منتقل کننده انرژی امواج ریز موج از مگنترون و کلایسترون به بخش شتاب‌دهی می‌باشد. مگنترون و کلایسترون نقشی مشابه تقویت کننده‌های امواج ریزموج[۸] ایفا می‌کنند. توان RF تولیدی توسط موجبرهای

۱. Modulator
۲. Stand
۳. Gantry
۴. Treatment coach
۵. Varian

۶. Klystron
۷. Wave guide
۸. Microwave



شکل ۴. نمودار توزیع مراکز پرتودرمانی در سراسر جهان به نسبت جمعیت هر کشور.

مستطیلی استانداردی که برای جلوگیری از شکست الکتریکی با گاز SF_6 در فشار بالا پر شده، به جفت‌کننده[۱] ورودی ساختار شتاب‌دهی تزریق می‌گردد. یک گردش دهنده[۲] که شتابگر خطی و منبع توان را نسبت به هم ایزوله می‌کند، توان بازگشتی به سمت منبع را برای جلوگیری از آسیب دیدن آن به یک اتلاف‌گر آبی منتقل می‌نماید. شتابگر خطی و منبع توان، هر دو باید به‌طور مطلوبی تا فشار 10^{-6} Torr خلأ شده باشند. پنجره‌های سرامیکی برای جدا کردن موجبر پر از گاز و بخش‌های تحت خلأ به کار می‌روند. فرکانس منبع توان باید به طور دقیق با فرکانس تشدید ساختار شتاب‌دهی تطبیق داده شود، تا توان رسیده به کاواک شتاب‌دهی به‌طور مطلوبی به باریکه الکترونی انتقال یابد. اما گرم شدن سطحی کاواک ریزموج، ناشی از موج فرکانس رادیویی، ابعاد کاواک را تغییر داده و باعث کاهش فرکانس تشدید می‌گردد. علاوه بر پیچیدگی ساختاری، هزینهٔ ساخت و ملاحظات مربوط به حفاظ‌های بیولوژیکی، مهم‌ترین عامل در هر شتاب‌دهنده پزشکی قابلیت آن در درمان سرطان محسوب می‌شود.

۴. وضعیت پرتودرمانی در دنیا:

طبق استانداردهای بین‌المللی برای هر ۱۸۰۰۰۰ نفر یک دستگاه شتاب‌دهنده خطی پزشکی مورد نیاز می‌باشد. براساس مطالعات میدانی صورت گرفته و جمع‌آوری اطلاعات مربوطه، توزیع مراکز پرتودرمانی در سراسر جهان به نسبت جمعیت هر کشور در شکل ۴ این مقاله نشان داده شده است.

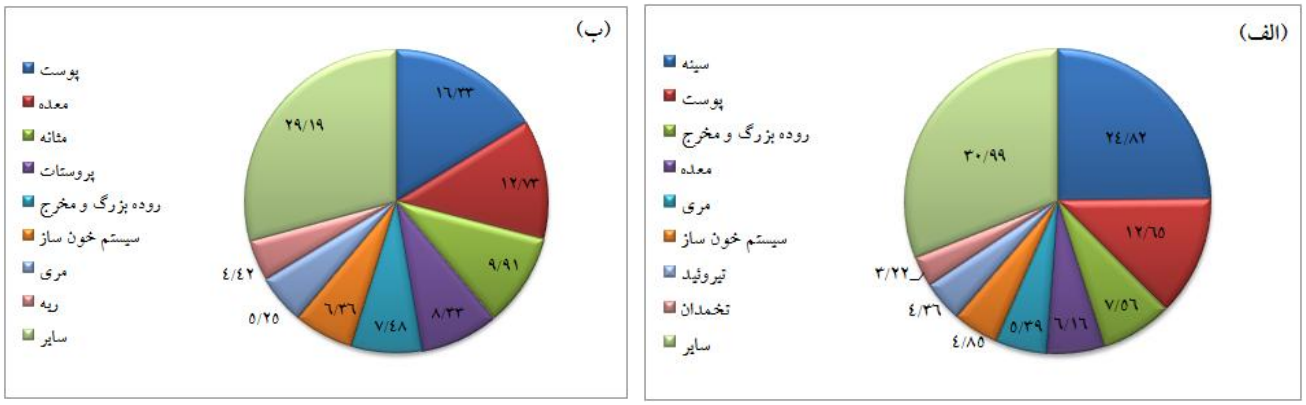
۵. وضعیت پرتودرمانی در ایران

سالانه بیش از ۷۰۰۰۰ مورد جدید سرطان در کشور اتفاق می‌افتد و بیش از ۳۰۰۰۰ نفر در اثر سرطان جان خود را از دست می‌دهند [۷]. از طرفی با افزایش امید به زندگی و افزایش درصد سالمندی در جمعیت کشور، انتظار می‌رود موارد بروز سرطان در دو دههٔ آینده به دو برابر افزایش یابد. درصد وقوع سرطان‌های مختلف برای دو گروه جنسی زنان و مردان بر طبق آخرین گزارش وزارت بهداشت مطابق با شکل ۵ است.

بیمارستان سیدالشهدا اصفهان اولین بیمارستان کشور است که از شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون استفاده می‌کند. این شتاب‌دهنده که ساخت شرکت CGR فرانسه بوده است، در سال ۱۳۶۲ توسط شخصی خیرخواه و با صرف هزینهٔ ۲٫۲

۱. Coupler

۲. Circulator



شکل ۵. درصد وقوع انواع سرطان‌ها برای دو گروه جنسی الف) زنان و ب) مردان بر طبق آخرین گزارش وزارت بهداشت [۷].

شکل ۶. اولین شتاب‌دهنده خطی الکترون پزشکی نصب شده در ایران (بیمارستان سیدالشهدا اصفهان ۱۳۶۲).

میلیون دلار تهیه شده است و در واقع اولین شتاب‌دهنده خطی پزشکی کشور را می‌توان یک شتاب‌دهنده وقفی دانست. این شتاب‌دهنده که در شکل ۶ نشان داده شده است با وجود مستهلک شدن قطعات، همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین سال پس از ورود این شتاب‌دهنده، دومین شتاب‌دهنده در تهران نصب می‌گردد و پس از آن در دهه هفتاد هجری شمسی چند شتاب‌دهندهٔ دیگر وارد کشور شدند که عموماً ساخت نپتون لهستان و فیلیپس آلمان بودند که هنوز هم چند نمونه از آن‌ها در مراکز پرتودرمانی کشور استفاده می‌شوند. هم اکنون، چندین شرکت در زمینه ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون پزشکی در دنیا فعالیت دارند که از این میان، شرکت‌های واریان، زیمنس و الکتا شناخته شده‌ترند و در مراکز پرتودرمانی ایران نیز، چند نمونه از این شتاب‌دهنده‌ها برای درمان مبتلایان به انواع سرطان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مختصری از مشخصات رایج‌ترین انواع شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۷ نیز انواع پرکاربرد این شتاب‌دهنده‌ها را نشان می‌دهد.

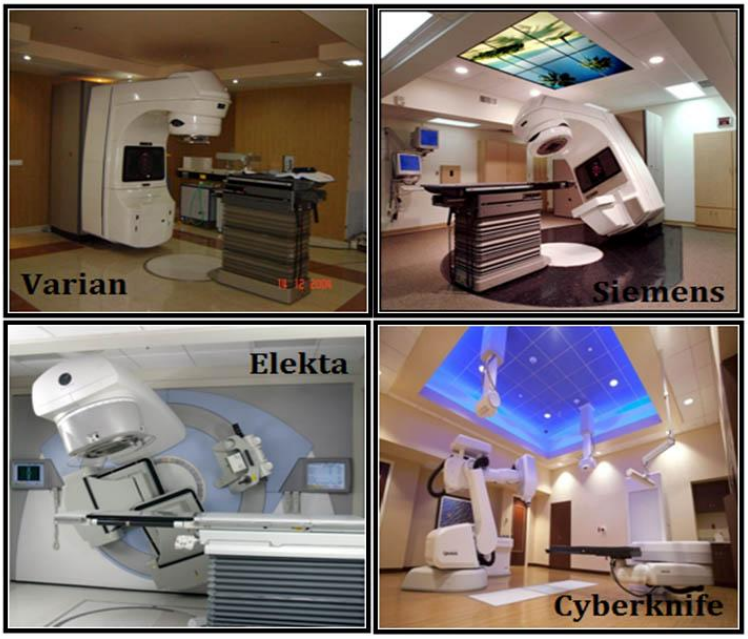
با جمع‌آوری آخرین اطلاعات از مراکز مختلف مشخص شد که هم اکنون حدود ۴۵ مرکز فعال پرتودرمانی و ۵۲ شتاب‌دهنده خطی الکترون پزشکی در حال کار در کشور وجود دارد. علاوه بر آن، تعداد ۱۵ دستگاه کبالت-۶۰ نیز در مراکز پرتودرمانی کشور نصب بوده و بعضی در حال استفاده هستند. متأسفانه به دلیل مشکلات اقتصادی و تحریم‌های موجود، چشمهٔ اکثر آن‌ها از قدرت مناسب برخوردار نیستند و ناگزیر اغلب برای درمان‌های تسکینی استفاده می‌شوند. اکتیویته مناسب این سیستم‌ها بین ۶ الی ۱۰ هزار کوری[۱] است، در حالی‌که سیستم‌های موجود با چشمه‌های کمتر از ۳ هزار کوری کار می‌کنند.

در شکل ۸، تعداد کل دستگاه‌های شتاب‌دهنده خطی الکترون موجود در هر استان کشور روی نقشه جغرافیایی مشخص شده است. با احتساب نیاز به چهار دستگاه پرتو درمانی برای یک میلیون نفر، جمعیت بیش از ۷۵ میلیون نفری ایران نیازمند ۳۰۰ سامانه پرتودرمانی مجزا است که با آهنگ

۱. Curie

جدول ۲. مشخصات مدل‌های مختلف شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون پزشکی.

نام کمپانی	نام مدل	انرژی فوتون (MeV)	انرژی الکترون (MeV)	نوع تفنگ الکترونی	ابعاد اتاق L×W×H(cm)	مولد فرکانس رادیویی
Elekta	Elekta synergy	۴،۱۰،۶،۱۵،۱۸،۲۵	۶،۹،۱۲،۱۵،۱۸،۲۵	دیودی	۶۱۰×۶۰۰×۲۶۰	مگنترون
	Elekta synergy platform	۴ – ۲۵	۶ – ۲۰			
	Elekta synergy S	۴،۶،۱۰،۱۵،۱۸،۲۵	۶،۹،۱۲،۱۵،۱۸،۲۵			
	Precise FS	۴ – ۱۵	۶،۹،۱۲،۱۵،۱۸			
	Precise FX	۴ – ۲۵	۶ – ۲۰			
	Precise SE	۶	۶،۹،۱۲،۱۵			
Siemens	ONCOR Avant-Grade	۶ – ۲۳	۵ – ۲۱	گریدی	۲۶۰×۶۱۰×۵۹۴	کلایسترون
	ONCOR Impression	۴ – ۱۵	۵ – ۱۴			مگنترون
	ONCOR Impression^{+}	۶ – ۲۳	۵ – ۲۱			کلایسترون
	PRIMUS	۴ – ۱۵	۵ – ۱۴			مگنترون
	PRIMUS^{+}	۶ – ۲۳	۵ – ۲۱			کلایسترون
Tomotherapy	Hi-Art	۶	n/a	گریدی	۳۰۴×۵۱۸×۶۷۰	مگنترون
Varian	Clinac 6EX	۶	n/a	دیودی	۳۱۵×۶۰۰×۶۶۰	مگنترون
	Clinac 600C					
	Clinac 600C/D					
	Clinac iX	۴ – ۲۳	۴ – ۲۲	گریدی	۳۰۰×۶۰۰×۷۶۸	کلایسترون
	Trilogy					



شکل ۷. انواع شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی ساخت شرکت‌های مختلف.

شکل۸ . آخرین توزیع فراوانی دستگاه شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون در استان‌های کشور تا انتهای سال ۹۲ (حاصل از مطالعات میدانی).

رشد جمعیت کشور (به خصوص جمعیت با سن بالا) و نیز رشد ضریب ابتلا به سرطان، این مقدار افزایش خواهد یافت. لازم به‌ذکر است هم‌اکنون ۳۵ مرکز درمانی دانشگاه علوم پزشکی نیاز شدیدی به راه‌اندازی یا ارتقاء سامانه پرتودرمانی خود دارند. نکتهٔ دیگر اینکه کشور ما تا ۲۰ سال آتی با آهنگ رشد جمعیت ۱٫۵ درصدی در سال و همچنین با احتساب ثابت ماندن تقاضا (صرف‌نظر از رشد ابتلا به سرطان) نیاز به ۴۳۰ دستگاه شتاب‌دهنده در ۲۱۵ مرکز پرتودرمانی دارد.

بررسی‌های مختلف در سطح کشور نشان می‌دهد که مشکل اصلی در ایران، فقط کمبود سیستم‌های پیشرفته نیست. در واقع، مهم‌تر از وجود چنین سیستم‌هایی، رفع مشکلات، کاستی‌ها و خطاهای فرایند پرتودرمانی می‌باشد که عمدهٔ آن‌ها را می‌توان در عدم ثابت نمودن دقیق بیمار در حین درمان، عدم استفاده از شبیه‌سازهای CT[1] ، مشکلات ناشی از مرز بندی[2] و طراحی درمان، عدم انطباق شرایط طراحی درمان با درمان واقعی در اتاق شتاب‌دهنده، عدم استفاده از سیستم تصویربرداری هم‌زمان حین درمان[3] برای اطمینان از صحت موقعیت درمان و انطباق میدان حقیقی و میدان درمانی طراحی شده و در نهایت عدم استفاده از تکنیک MLC[4] در حین درمان دانست.

۶. جمع‌بندی

همان‌طور که در این مقاله اشاره شد، شتاب‌دهندهٔ خطی الکترون رایج‌ترین ابزار برای درمان سرطان در دنیا است. با نگاهی به استاندارد تعداد شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی در کشورهای توسعه‌یافته و آمار مبتلایان به سرطان، می‌توان به کمبود شدید شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی در کشور پی برد. علاوه بر آن، عدم استفاده صحیح از امکانات موجود از

۱. Computed Tomography

۲. Contouring

۳. Portal image

۴. Multi Leaf Collimator

دیگر مشکلات مهم در این زمینه می‌باشد. از این‌رو، افزایش تعداد مراکز پرتودرمانی با استفاده از شتاب‌دهندهٔ خطی به تعداد حداقل سه برابر وضعیت موجود و تربیت کاربران و پرسنل کار آمد جهت افزایش دقت در فرایند درمان همراه با به کارگیری روش‌های نوین پرتودرمانی امری لازم و ضروری است.

سپاسگزاری

با تشکر از آقایان شهرام منادی، امیرحسین میردامادی، حسین سیار و خانم سارا زارعی که در جمع‌آوری اطلاعات آماری و نگارش این مقاله همکاری داشته‌اند.

مراجع

1. Richard Pazdur et al., "*Cancer Management: A Multidisciplinary Approach*", 10th Edition (2008).
2. D Baltas et al., "*The Physics of Modern Brachytherapy for Oncology*", CRC Press (2007).
3. E B Podgorsak, "*Radiation Oncology Physics*": A Handbook for Teachers and Students, International Atomic Energy Agency, Chapter 5 (2005).
4. A L Baert et al., "*New Technologies in Radiation Oncology*", Springer (2006).
5. C John Ford, "*Microwave Electron Linac in the Treatment of Cancer*", IEEE, Chicago (2001).
6. C J Karzmark et al., "*Medical linear Accelerators*", Stanford University of Medicine (1993).
۷. وزارت بهداشت درمان آموزش پزشکی، گزارش کشوری ثبت موارد سرطانی سال ۱۳۸۸، جمهوری اسلامی ایران، خردادماه (۱۳۸۹).