



بررسی اثرات اندازه تومور و نوع رادیونوکلید بر درمان پذیری تومور در رادیوتراپی هدفمند

حسن رنجبر^{۱*}، علی بهرامی سامانی^۱، محمد قنادی مراغه^۱، داوود بیکی^۲

^۱ گروه رادیوشیمی، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

^۲ مؤسسه تحقیقات پزشکی هسته‌ای، دانشگاه علوم پزشکی تهران

(دریافت مقاله: ۹۳/۳/۱ - پذیرش مقاله: ۹۳/۴/۲۳)

چکیده

زمینه: رادیوتراپی هدفمند یکی از روش‌های مهم رادیوتراپی است که شامل استفاده از رادیونوکلیدهای ساطع کننده ذرات بتا برای تحویل دوز تابشی به سلول‌های تومور می‌شود. از ویژگی‌های مهم در این روش، برد ذرات بتای گسیل شده از رادیونوکلیدها و اندازه تومور می‌باشد که اثرات قابل توجهی بر درمان پذیری تومورها دارد.

مواد و روش‌ها: از شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل ریاضی جهت بررسی ارتباط بین احتمال درمان پذیری تومور و اندازه تومور برای تومورهای درمان شده با ^{۱۳۱}I و ^{۹۰}Y استفاده شد. در این مدل فرض شد که رادیونوکلید به صورت یکنواخت در تمامی تومور توزیع شده است.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهند که یک اندازه تومور بهینه برای درمان وجود دارد. برای هر اکتیویته جمعی، احتمال درمان پذیری برای تومورهایی که قطرشان نزدیک به این مقدار بهینه باشد بیشتر است. ماکزیمم احتمال درمان برای ^{۱۳۱}I برای تومورهای با قطر حدود ۳/۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد در حالیکه برای ^{۹۰}Y این ماکزیمم برای تومورهای با قطر حدود ۳/۵ سانتی‌متر رخ می‌دهد. تومورهای کوچک‌تر از اندازه بهینه آسیب پذیری کمتری به پرتوهای رادیونوکلیدها دارند زیرا مقدار قابل توجهی از انرژی واپاشی فرار کرده و بیرون از حجم تومور انباشت می‌شود. تومورهای بزرگ‌تر از اندازه بهینه بخاطر تعداد سلول‌های بیشتر، درمان پذیری کمتری دارند.

نتیجه‌گیری: در درمان به روش رادیوتراپی هدفمند با تک-رادیونوکلید، یک اندازه درمان بهینه وجود دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که از رادیوتراپی هدفمند با تک رادیونوکلید برای درمان سرطان‌های گسترش یافته که معمولاً دارای اندازه‌های مختلف هستند، استفاده نشود. استفاده از چند رادیونوکلید به‌طور همزمان اثربخشی بیشتری نسبت به استفاده از تک رادیونوکلید می‌تواند داشته باشد. این نگرش استفاده از ترکیب رادیونوکلیدها با ویژگی‌های تکمیلی، ارائه تدابیر جدید و افزایش بازدهی درمان تومور را می‌تواند میسر سازد.

واژگان کلیدی: رادیوتراپی هدفمند، درمان پذیری تومور، کسر جذبی انرژی، ید-۱۳۱، ایتريوم-۹۰

* تهران، گروه رادیوشیمی، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

مقدمه

توزیع دوز تابشی در تومور به اندازه تومور، نوع رادیونوکلید و توزیع آن در تومور بستگی دارد. زمانی که اندازه تومور در مقایسه با برد ذرات یونیزان بزرگ باشد، بیشتر انرژی در تومور جذب می‌شود در حالی که اگر ابعاد تومور کوچکتر از برد ذرات باشد مقدار زیادی از انرژی می‌تواند فرار کند و بیرون از تومور انباشت شود. در این کار کسر جذبی انرژی برای دو رادیونوکلید ^{131}I و ^{90}Y و همچنین تأثیر نوع رادیونوکلید و اندازه تومور بر احتمال درمان‌پذیری تومور در روش رادیوتراپی هدفمند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر اندازه تومور بر احتمال درمان‌پذیری تومور به وسیله روش رادیوتراپی هدفمند و همچنین اثر اندازه تومور بر کسر جذبی انرژی، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل ریاضی استفاده گردید. همچنین جهت تحقیق روی اثر نوع رادیونوکلید بر احتمال درمان‌پذیری تومور از دو رادیونوکلید ^{131}I و ^{90}Y که مکرراً مورد استفاده بالینی قرار گرفته‌اند استفاده شد.

محاسبه کسر جذبی

جهت محاسبه کسر جذبی رادیونوکلیدهای گسیل‌کننده ذرات بتا می‌بایستی تمام تابش‌های آن را به حساب آورد به عبارت دیگر به جای استفاده از میانگین انرژی ذرات بتا می‌بایستی از طیف تابشی ذرات بتا استفاده نمود. کسر جذبی انرژی، به صورت مستقیم برای هندسه‌ها و طیف‌های انرژی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو قابل محاسبه می‌باشد. در کد مونت کارلو MCNP محدوده انرژی ترابرد الکترون و فوتون

مزیت نظری و اصلی رادیوتراپی هدفمند این است که در این روش، پرتوهای حاصل از ذرات گسیل شده از رادیونوکلیدهای می‌تواند به صورت انتخابی به تومورها و متاستازهای کوچک منتقل شود. رادیونوکلیدهای زیادی برای این روش درمانی مورد نظر هستند (۱).

ید-۱۳۱ و ایتريوم-۹۰ رادیونوکلیدهای ساطع‌کننده بتا می‌باشند و مکرراً مورد استفاده بالینی قرار گرفته‌اند (۸-۲). در درمان سرطان‌های سیستم لنفاوی مانند لنفومای غیر هوچکین و متاستازهای کبدی این دو رادیونوکلید مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بالینی آن‌ها رضایت‌بخش بوده است (۸-۱۲). در درمان‌های مبتنی بر پرتوهای، درمان تومور به سه فاکتور عمده بستگی دارد:

- دوز تابشی جذب شده در تومور و چگونگی منتقل شدن تابش به آن
- تعداد سلول‌های کلونوزنیک تومور (Clonogenic Cell)
- پاسخ سلول‌های تومور به تابش

این فاکتورها به همان اندازه که در رادیوتراپی هدفمند مهم هستند در رادیوتراپی خارجی نیز حائز اهمیت می‌باشند. در رادیوتراپی هدفمند دوز تابشی جذب شده بخاطر شار ذرات یونیزان حاصل از رادیونوکلید توزیع شده در داخل و اطراف تومور، می‌باشد. توزیع رادیونوکلید به ویژگی‌های بیولوژیکی تومور بستگی دارد. عواملی مانند میل ترکیبی و جذب سلول‌های تومور، اندازه و نفوذپذیری عروق خونی تومور، چگونگی و میزان توزیع رادیونوکلید در تومور را تعیین می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی رادیونوکلید، تغییرپذیری بیشتری در توزیع رادیونوکلید تحمیل می‌کند. بنابراین

مانده (N_s) با ضریب حساسیت تابشی α پس از دریافت دوز D به صورت زیر است:

$$N_s = N_c \exp(-\alpha D) \quad (2)$$

مهم‌ترین ویژگی در روش پرتودهی هدفمند، رابطه بین اندازه تومور و کسر انرژی جذب شده در تومور می‌باشد. برای یک تومور کروی کسری از انرژی ذرات یونیزان که در تومور جذب می‌شود با افزایش اندازه تومور افزایش می‌یابد و این افزایش بستگی به توزیع انرژی ذرات ساطع شده از رادیونوکلید توزیع شده در تومور دارد.

دوز میانگین جذب شده حاصل از توزیع یکنواخت رادیونوکلید در تومور با قطر d به صورت زیر می‌باشد:

$$D = \phi(d) E C_0 \quad (3)$$

که در آن E انرژی میانگین ساطع شده به ازای واحد اکتیویته تجمعی و C_0 اکتیویته میانگین تجمعی به ازای واحد جرم و $\phi(d)$ نشان دهنده کسر جذبی انرژی تابشی است. مقادیر E برای تمام رادیونوکلیدها قابل محاسبه می‌باشد (۱۸). با قرار دادن تعداد سلول‌های کلونوزئیک تومور N_c و دوز جذبی D (معادله ۱ و ۳) در معادله ۲ خواهیم داشت که:

$$N_s = K N \exp(-\alpha \phi(d) E C_0) \quad (4)$$

احتمال درمان‌پذیری تومور (P_c) احتمالی در نظر گرفته شده که تعداد سلول‌های کلونوزئیک تومور به حداقل یعنی صفر برسد. این برابر است با جمله اول توزیع پواسون، یعنی:

$$P_c = \exp(-N_s) \quad (5)$$

با قرار دادن معادله ۴ در معادله ۵ به دست می‌آید:

$$P_c = \exp(-K \exp(-\alpha \phi(d) E C_0) N) \quad (6)$$

به منظور ارتباط احتمال درمان‌پذیری به تعداد سلول‌های تومور، $\phi(d)$ نیز باید برحسب تابعی از N بیان شود. تعداد سلول‌های تومور در یک تومور با

از ۱keV تا ۱۰۰ MeV گسترش دارد (۱۳). گستردگی در محدوده انرژی پایین به ما اجازه بررسی صحیح و دقیق برهمکنش‌های فوتون، الکترون و تابش‌های ایکس مشخصه و غیره را می‌دهد. در این مدل، هندسه تومور به صورت کره‌های با شعاع‌های $20 \mu\text{m}$ تا 5cm تعریف شد. جنس آن، بافت نرم با چگالی $1/0.4$ و ترکیباتش از گزارش شماره ۴۴ و ۴۶ کمیته بین‌الملل اندازه‌گیری پرتو استخراج گردید (۱۴). در این محاسبات فرض شد که رادیونوکلید ^{131}I و ^{90}Y به صورت یکنواخت داخل تومور توزیع شود و کسر جذبی برای دو رادیونوکلید با استفاده از دستور انباشت انرژی (*F8) محاسبه گردید. برای اجرای هر شبیه‌سازی حدود $10^6 \times 1-2$ ذره دنبال و پیگیری شد که نتیجه آن حصول خطای نسبی کمتر از ۱ درصد شد.

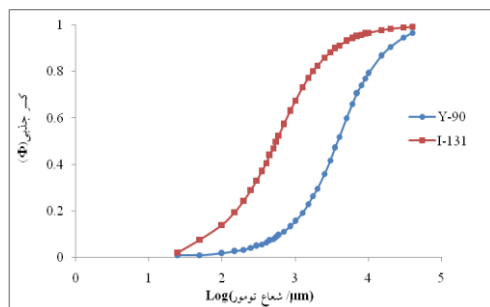
مدل درمان‌پذیری تومور بوسیله رادیوتراپی هدفمند

اکنون موقعیتی در نظر گرفته می‌شود که یک تومور در نتیجه واپاشی رادیونوکلیدی که درون تومور توزیع شده است، تحت تابش و پرتوگیری قرار گرفته است. برای یک تومور با حساسیت یکسان به پرتو، مهمترین عامل تعیین درمان‌پذیری، تعداد سلول‌های کلونوزئیک تومور می‌باشد. رابطه بین درمان‌پذیری و تعداد سلول‌های کلونوزئیک می‌تواند به وسیله مدلی معروف، مبتنی بر آمار پواسون مورد ارزیابی قرار گیرد (۱۵).

چنانچه یک تومور از N سلول تشکیل شده باشد و کسر K آن، سلول کلونوزئیک باشد آنگاه تعداد سلول‌های کلونوزئیک تومور (N_c) برابر است با:

$$N_c = K N \quad (1)$$

با توجه به اینکه تعداد سلول‌های زنده مانده پس از دریافت دوز D به صورت $N = N_0 \exp(-\alpha D)$ است (۱۶ و ۱۷) بنابراین تعداد سلول‌های کلونوزئیک زنده



شکل ۱) ارتباط بین کسر جذبی انرژی و شعاع تومور برای رادیونوکلیدهای ^{90}Y و ^{131}I

شکل ۲ و ۳ مجموعه‌ای از منحنی‌های احتمال درمان تومور برحسب اندازه تومور را برای رادیونوکلید ^{131}I و ^{90}Y نشان می‌دهند. در هر شکل، منحنی‌ها مربوط به مقادیر مختلف اکتیویته تجمعی در تومور می‌باشد. این منحنی‌ها ویژگی‌های کلی رابطه بین درمان پذیری و عوامل مؤثر بر آن را نشان می‌دهند. از مقایسه دو شکل این نتیجه حاصل می‌شود که منحنی درمان پذیری برای رادیونوکلیدها از نظر کیفی شبیه به این دو شکل خواهند بود هر چند از نظر کمی، پیک منحنی‌ها در قطرهای متفاوت ظاهر خواهد شد. همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند که مقدار ماکزیمم احتمال درمان بسته به نوع رادیونوکلید در اندازه تومورهای مختلف ظاهر می‌شود. به عبارت دیگر این شکل‌ها نشان می‌دهند که یک اندازه بهینه برای احتمال درمان پذیری تومور وجود دارد.

از شکل ۲ مشاهده می‌شود که ماکزیمم احتمال درمان برای ^{131}I برای تومورهای با قطر حدود ۳/۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد در حالی که برای ^{90}Y همان‌طور که از شکل ۳ قابل مشاهده است، این ماکزیمم برای تومورهای با قطر حدود ۳/۵ سانتی‌متر رخ می‌دهد. از نتایج مشخص است که برای تومورهای با اندازه‌ی کوچک‌تر از اندازه بهینه، احتمال درمان پذیری تومور با کاهش اندازه به تدریج کم می‌شود.

قطر d به صورت زیر می‌باشد:

$$N = q \left(\frac{d}{d_c} \right)^3 \quad (7)$$

$$N = q \left(\frac{d}{d_c} \right)^3$$

q ضریب فشردگی می‌باشد که سهم حجم تومور که به وسیله سلول‌های تومور اشغال شده است را نشان می‌دهد و d_c قطر سلول‌های تومور می‌باشد. احتمالاً مقدار q تابعی از اندازه تومور می‌باشد که در این مدل فرض می‌شود مقدارش برای همه اندازه‌ها ثابت می‌باشد. بدین منظور در محاسبات، q برابر 0.4 و d_c برابر 20 میکرومتر در نظر گرفته شد. اکنون می‌توان کسر جذبی $\phi(d)$ را به صورت $\phi(N)$ بیان کرد.

با جای گذاری $\phi(N)$ به جای $\phi(d)$ و همچنین معادله ۷ در معادله ۶ احتمال درمان پذیری تومور به روش رادیوتراپی هدفمند به صورت زیر خواهد شد:

$$P_c = \exp(-k q \left(\frac{d}{d_c} \right)^3 \exp(-\alpha \phi(N) E C_0)) \quad (8)$$

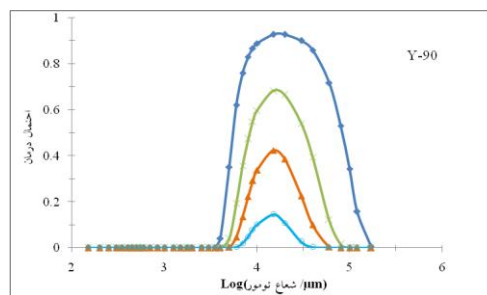
احتمال درمان پذیری برای تومورهای با شعاع 100 میکرومتر تا $4/5$ سانتی‌متر محاسبه گردید. در این محاسبات از کسر جذبی که در قسمت قبل برای تومورهای با اندازه‌های مختلف به دست آمد استفاده شد. مقادیر حساسیت تومور (α) 0.7 Gy^{-1} و کسر سلول‌های کلونوژنیک تومور 0.1 لحاظ شد (۱۹ و ۲۰).

یافته‌ها

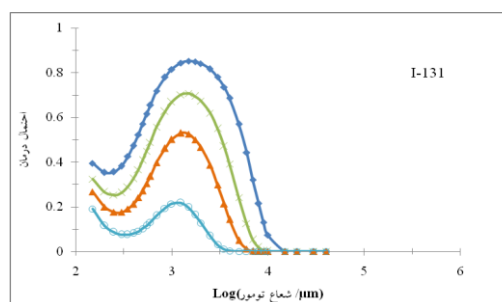
شکل ۱ رابطه بین کسر جذبی و شعاع تومور را برای دو رادیونوکلید ^{131}I و ^{90}Y نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقدار نهایی کسر جذبی برای توزیع حجمی، یک است. بدین معنی که زمانیکه تومور در مقایسه با برد ذرات گسیلی از رادیونوکلید بزرگ‌تر باشد، تقریباً تمام انرژی در محیط مورد نظر جذب می‌شود.

رادیونوکلیدی، یک اندازه درمان بهینه وجود دارد که با افزایش اندازه تومور، احتمال درمان به تدریج کاهش پیدا می‌کند. در این بازه (تومورهای با قطر بزرگتر از قطر بهینه) مکانیسم اصلی، افزایش تعداد سلول‌های کلونوژنیک می‌باشد که منجر به کاهش درمان‌پذیری تومور می‌شود.

نکته مهم دیگر از نتایج، مربوط به تومورهای با اندازه کوچک‌تر از اندازه بهینه است که با کاهش اندازه تومور احتمال درمان کمتر می‌شود. در این موارد مکانیسم اصلی به خاطر کاهش توانایی جذب انرژی ساطع شده از رادیونوکلید در تومور می‌باشد. تومورهایی که در این گروه قرار می‌گیرند به‌طور مؤثری نسبت به رادیوتراپی هدفمند مقاومت نشان می‌دهند و اندازه درمان بهینه مربوط به نقطه‌ای است که یک تعادلی بین این دو مکانیسم رقیب، ایجاد شود. پیش‌بینی کاهش احتمال درمان تومورهای کوچک‌تر از اندازه بهینه، به‌صورت تجربی آزمایش و اثبات شده است (۲۱). در آن کار، برای درمان نوروبلاستوما با اندازه‌های مختلف (۲۵۰ و ۴۰۰ میکرومتر) از MIBG استفاده شد. تأخیر در رشد و درمان آن هدف نهایی در نظر گرفته شد که آسیب‌پذیری کمتر برای تومورهای با اندازه کوچک‌تر، از یافته‌های آن‌ها بود.



شکل ۲) احتمال درمان‌پذیری تومور نسبت به اندازه تومور برای درمان به روش پرتودهی هدفمند برای ^{90}Y و با مقادیر مختلف اکتیویته تجمعی در تومور.



شکل ۳) احتمال درمان‌پذیری تومور نسبت به اندازه تومور برای درمان به روش پرتودهی هدفمند برای ^{131}I و با مقادیر مختلف اکتیویته تجمعی در تومور.

بحث

در این کار، درمان به روش رادیوتراپی هدفمند و اثر نوع رادیونوکلید و اندازه تومور بر احتمال درمان‌پذیری تومور مورد ارزیابی قرار گرفت. در درمان به روش رادیوتراپی هدفمند برای هر

جدول ۱) پاسخ کلینیکی رادیوتراپی هدفمند (۲۱)

رادیودارو	ذره واپاشی	نیمه عمر	انرژی واپاشی (MeV)	زمان پاسخ (روز)	طول پاسخ (ماه)
^{32}P	بتا	۱۴/۳ روز	۱/۷۱	۱۴	۳
^{89}Sr	بتا	۵۰/۵ روز	۱/۴۶	۲۱	۶
$^{153}\text{Sm-EDTMP}$	بتا / گاما	۴۶/۳ ساعت	۰/۸۱	۷	۲-۳
$^{186}\text{Re-HEDT}$	بتا / گاما	۸۹ ساعت	۱/۰۷	۷	۲
^{223}Ra	آلفا / گاما	۱۱/۴ روز	۲۸	-	-

هستند بنابراین امکان انتخاب یک تک-رادیونوکلید برای اثر درمانی مطلوب، وجود داشت ولی این

اگر به صورت دقیق معلوم بود که تمام تومورهای موجود در یک بیمار، دارای اندازه معین و یکسان

اثر بخشی بیشتری نسبت به استفاده از تک رادیونوکلید می‌تواند داشته باشد. این نگرش استفاده از ترکیب دو رادیونوکلید با ویژگی‌های تکمیلی، ارائه تدابیر جدید و افزایش بازدهی درمان تومور را می‌تواند میسر سازد.

سپاس و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های سرکار خانم منصوریان‌فر و همچنین از زحمات جناب آقای مفتاحی و جناب آقای آذری به دلیل همکاری صمیمانه، تقدیر و سپاس‌گزاری به عمل آورند.

موضوع به ندرت رخ می‌دهد و معمولاً بیماران سرطانی، دارای متاستازهای با اندازه‌های مختلف و یا سرطان‌های گسترش‌یافته هستند (۸ و ۱۰). با توجه به تفاوت نیمه عمر و انرژی ذرات گسیل شده از رادیونوکلید، پاسخ رادیوداروهای مختلف همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است متفاوت هستند. به عبارت دیگر یک رادیودارو با نیمه عمر و انرژی بالا زمان پاسخ (شروع تسکین) کند خواهد داشت در حالی که رادیوداروی با نیمه عمر و انرژی پایتتر زمان پاسخ سریع دارد هر چند که طول درمان کوتاه‌تری نسبت به رادیوداروی قبلی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از چند رادیونوکلید به‌طور همزمان

References:

- Mausner LF, Srivastana SC. Selection of radionuclides for radioimmunotherapy. *Med Phys* 1993; 20: 503-9.
- Zhang J, Hu H, Liang S, et al. Targeted radiotherapy with tumor vascular homing trimeric GEBP11 peptide evaluated by multimodality imaging for gastric cancer. *J Control Release* 2013; 172: 322-9.
- Tesson M, Mairs R, Maresca K, et al. Enhancement of prostate-targeted radiotherapy using [¹³¹I]MIP-1095 in combination with radiosensitizing chemotherapeutic drugs. *J Nucl Med* 2013; 54: 119.
- Wilson JS, Gains JE, Moroz V, et al. A systematic review of ¹³¹I-meta iodobenzylguanidine molecular radiotherapy for neuroblastoma. *Eur J Cancer* 2014; 50: 801-15.
- Kraal KC, van Dalen EC, Tygat GA, et al. Iodine-131-meta-iodobenzylguanidine therapy for patients with high-risk neuroblastoma. *The Cochrane Library*: John Wiley & Sons, Ltd. 2013.
- Mittal S, Bhadwal M, Das T, et al. Synthesis and Biological Evaluation of ⁹⁰Y-Labeled Porphyrin-DOTA Conjugate: A Potential Molecule for Targeted Tumor Therapy. *Cancer Biother Radiopharm* 2013; 28: 651-6.
- Bodei L, Cremonesi M, Paganelli G. Yttrium-Based Therapy for Neuroendocrine Tumors. *PET Clin* 2014; 9: 71-82.
- Gulec SA, Barot TC. Y-90 Radiomicrosphere Therapy of Colorectal Cancer: Liver Metastases. *Image-Guided Cancer Therapy* 2013; 441-54.
- Scheidhauer K, Wolf I, Baumgartl HJ, et al. Biodistribution and kinetics of ¹³¹I-labelled anti-CD20 MAB IDEC-C2B8 (rituximab) in relapsed non-Hodgkin's lymphoma. *Eur J Nucl Med* 2002; 29: 1276-82.
- Kang GW, Kang HJ, Shin DY, et al. Radioimmunotherapy with ¹³¹I-Rituximab in a Patient with Diffuse Large B-Cell Lymphoma Relapsed After Treatment with ⁹⁰Y-Ibritumomab Tiuxetan. *Nucl Med Mol Imaging* 2013; 47: 281-4.
- Vaklavas C, Meredith RF, Shen S, et al. Phase I Study of a Modified Regimen of ⁹⁰Yttrium-Ibritumomab Tiuxetan for Relapsed or Refractory Follicular or Transformed CD20+Non-Hodgkin Lymphoma. *Cancer Biother Radiopharm* 2013; 28: 370-9.
- Kang HJ, Lee SS, Byun BH, et al. Repeated radioimmunotherapy with ¹³¹I-rituximab for patients with low-grade and aggressive relapsed or refractory B cell non-Hodgkin lymphoma. *Cancer Chemother Pharmacol* 2013; 71: 945-53.
- Briestmaister J. MCNP—A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C3, Los Alamos Nat. Lab Report, LA13709-M 2000.
- ICRU. Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues, ICRU Report 46. Bethesda, MD:ICRU; 1992.
- Porter EH. The statistics of dose-cure relationships for irradiated tumours. *Br J Radiol.* 1980; 53: 210-27.

16. Deacon J, Peckham MJ, Steel GC. The radioresponsiveness of human tumor and the initial slope of the cell survival curve. *Radiother Oncol* 1984; 2: 317-23.
17. O'Donoghue JA. The impact of tumor cell proliferation in radioimmunotherapy. *Cancer* 1994; 73: 974-80.
18. Hobbie RK, Roth BJ. *Intermediate Physics for Medicine and Biology*. 4th ed. New York: Springer 2007, 492-4.
19. Fertl B, Malaise EP. Intrinsic radiosensitivity of human cells is correlated With radioresponsiveness of human tumors: analysis of 101 published survival curves. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1985; 11: 1699-707.
20. Steel GO, Wheldon TE. The radiation biology of paediatric tumors. In: Pinkerton CR, Plowman PN editors. *Paediatric oncology: clinical practice and controversies*. London: Chapman and Hall 1991, p73-86.
21. van der Poel HG. Radionuclide treatment in metastasized prostate cancer. *EAU-EBU Update Series* 2007; 5: 113-25.

Original Article

Investigation of the effects of tumor size and type of radionuclide on tumor curability in targeted radiotherapy

H. Ranjbar^{1}, A. Bahrami Samani¹, M. Ghannadi Maragheh¹,
D. Beiki²*

¹ *Department of Radiochemistry, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran*

² *Research Institute for Nuclear Medicine, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.*

Received 22 May, 2014 Accepted 14 Jul, 2014)

Abstract

Background: Targeted radiotherapy is one of the important methods of radiotherapy that involves the use of beta-emitting radionuclides to deliver a dose of radiation to tumor cells. An important feature of this method is the tumor size and the finite range of beta particles emitted as a result of radionuclide disintegration those have significant effects for the curability of tumors.

Material and Methods: Monte Carlo simulations and mathematical models have been used to investigate the relationship of curability to tumors size for tumors treated with targeted ¹³¹I and ⁹⁰Y. The model assumed that radionuclides are distributed uniformly throughout tumors.

Results: The results show that there is an optimal tumor size for cure. For any given cumulated activity, cure probability is greatest for tumors whose diameter is close to the optimum value. There is a maximum value of curability that occurs at a diameter of approximately 3.5 mm for ¹³¹I. For ⁹⁰Y maximum curability occurs at a tumor diameter of approximately 3.5 cm. Tumors smaller than the optimal size are less vulnerable to irradiation from radionuclides because a significant proportion of the disintegration energy escapes and is deposited outside the tumor volume. Tumors larger than the optimal size are less curable because of greater clonogenic cell number.

Conclusion: With single radionuclide targeted radiotherapy, there is an optimal tumor size for tumor cure. It is suggested that single agent targeted radiotherapy should not be used for treatment of disseminated disease when multiple tumors of differing size may be present. The use of several radionuclides concurrently would be more effective than reliance on single radionuclide. This approach of using combination of radionuclides with complementary properties could hopefully prepare new measures and improve the efficiency of tumor therapy.

Key words: Targeted radiotherapy, Tumor curability, absorbed fraction, I-131, Y-90

*Address for correspondence: Department of Radiochemistry, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran; E-mail: hranjbar@aeoi.org.ir