



اجرای موازی کد MCNPX برای محاسبه دز در طراحی درمان مونت کارلو با استفاده از موزیکس کلاستر

ایرج جباری* ، فائزه فقیر

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری نوین، گروه مهندسی هسته ای

چکیده

محاسبه دوز به روش مونت کارلو در طراحی درمان رادیوتراپی روشی بسیار دقیق اما زمانبر است. یکی از راههای کاهش زمان محاسبات، استفاده از پردازش موازی است. نکته اساسی آن است که راندمان پردازش موازی شدیداً متأثر از پیچیدگی هندسه و عوامل دیگر است. در این پژوهش ابتدا راندمان پردازش سریع کد MCNPX برای محاسبه توزیع دز در یک فانتوم واکسل بندی شده با تعداد سلول متفاوت بر روی کلاستری از نوع Beowulf Cluster بررسی شده و سپس روشی برای افزایش راندمان آن با استفاده از MOSIX Cluster ارائه شده است. همچنین این روش برای محاسبه توزیع دز در طرح کانفورمال پروستات استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش ارائه شده در نمونه‌های کلینیکی تا چهار برابر سرعت محاسبات را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: طراحی درمان مونت کارلو، MCNPX، پردازش موازی، MOSIX Cluster

مقدمه

شبیه‌سازی به روش مونت کارلو به طور گسترده‌ای در فیزیک پزشکی به ویژه برای مدل‌سازی شتاب‌دهنده‌های خطی [۱ و ۲] و محاسبه دوز در رادیوتراپی [۳] استفاده می‌شود. در حال حاضر روش مونت کارلو به عنوان دقیق‌ترین روش محاسبه دوز محسوب می‌شود از اینرو تلاش‌های زیادی برای به کارگیری این روش در طراحی درمان کلینیکی انجام می‌شود [۴ و ۵]. مشکل اساسی روش مونت کارلو، زمان‌بر بودن آن است. یکی از روش‌های کاهش زمان محاسبات، استفاده از روش پردازش موازی است. پارامتر اصلی در پردازش موازی، راندمان موازی‌سازی است که با فاکتور تسریع (Speedup Factor) سنجیده می‌شود. به عبارتی ایده‌آل آن است که با به کارگیری همزمان N پردازنده، محاسبات N بار سریع‌تر انجام شود. در کدهای مونت کارلو این فاکتور به طور عمده به پیچیدگی هندسه مسئله وابسته است به نحوی که با افزایش تعداد سلول‌ها، فاکتور تسریع کاهش می‌یابد. که این امر در طراحی درمان مونت کارلو، به دلیل تعداد سلول بسیار زیاد حادثر است. در این تحقیق از کد MCNPX استفاده شده است. این کد در بسیاری از زمینه‌های فیزیک پزشکی استفاده می‌شود [۶-۸].



روش کار

الف) مشخصات سخت افزاری و نرم افزاری کلاستر: در این پژوهش از یک کلاستر محاسباتی شامل پنج گره (رایانه) محاسباتی تحت سیستم عامل لینوکس استفاده شد. هر گره متشکل از چهار پردازنده AMD چهار هسته‌ای (مجموعاً ۸۰ هسته) با فرکانس ۲ GHz است. از کامپایلر GCC برای کامپایل کردن کد-MCNPX ۷۲,۴ و از ۳,۴,۴ PVM جهت موازی سازی این کد استفاده شد. در مرحله اول این مجموعه به صورت یک کلاستر از نوع Beowulf Cluster تنظیم و راه اندازی شد. این نوع کلاستر به مجموعه‌ای از رایانه‌های تجاری یکسان نسبتاً ارزان اطلاق می‌شود. در مرحله بعد این مجموعه با استفاده از ۲,۳,۲,۴-MOSIX تنظیم و راه اندازی شد. موزیکس یک بسته نرم افزاری است که کرنل لینوکس را با قابلیت پردازش موازی گسترش داده و تمامی منابع کلاستر را به طرز بهینه‌ای مدیریت می‌کند [۹].

ب) شبیه سازی تابش فوتون بر یک فانتوم آب و کسل بندی شده: برای مقایسه زمان اجرای موازی یک فانتوم آب مکعبی ($30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) و کسل بندی شده تحت تابش بیم فوتون 18 MeV با ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}^2$ شبیه سازی شد. در این شبیه سازی تعداد و کسل ها (سلولها) متغیر و از 3^3 تا 4^3 انتخاب شد. همچنین از تالی $F8^*$ برای محاسبه دز در تمام و کسل ها استفاده شد و انرژی قطع الکترون 0.1 MeV انتخاب شد. به طور پیش فرض MCNP نتایج تالی ها را در انتها در یک فایل متنی ذخیره کرده، هر ۱۵ دقیقه کل اطلاعات را در یک فایل باینری RUNTPE ثبت نموده و دیاگرام نوسانات تالی را ده مرتبه در طول اجرای برنامه تولید می‌کند که این فرایند ارسال اطلاعات در بین گره‌ها را افزایش داده و باعث کاهش راندمان پردازش موازی می‌شود. تنظیمات مربوط به این فرایند از طریق آرگومانهای کارت PRDMP قابل تغییر است [۱۰]. شبیه سازی ها به دو روش انجام شد. در روش اول (روش مرسوم) کد MCNPX تحت PVM بر روی Beowulf Cluster با تعداد Task متغیر از ۱ تا ۹۰ برای دو حالت پیش فرض و تغییر در پارامترهای کارت PRDMP اجرا شد. در روش دوم (روش پیشنهادی) پردازش موازی کد MCNPX تحت PVM بر روی MOSIX Cluster برای همه شبیه سازی های قبلی تکرار شد. در این روش هر فایل ورودی N بار به طور همزمان با به کارگیری M هسته در پس زمینه و با Seed Number های متفاوت اجرا شد.

ج) شبیه سازی توزیع دز طراح درمان کلینیکی پروستات: جهت ارزیابی راندمان روش پردازش موازی پیشنهادی، یک طرح کانفورمال پروستات ایجاد شده با ۷ میدان تابشی توسط یک سیستم طراحی درمان TiGRT (LinaTech LLC, USA) برای فوتون 18 MeV انتخاب و محاسبات توزیع دز با استفاده از قابلیت مش تالی کد MCNPX انجام شد. برای این کار داده های سی تی پروستات یک بیمار شامل ۳۲ اسلایس سی تی با



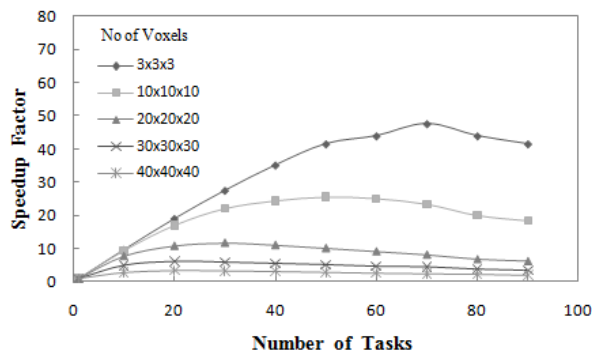
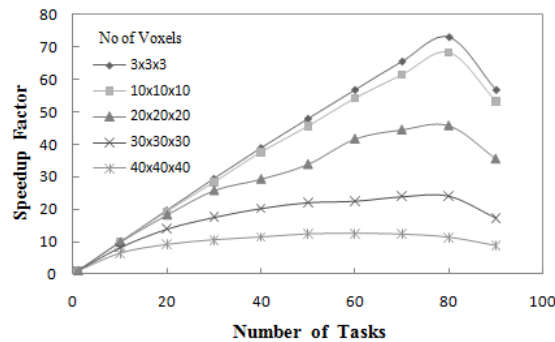
رزولوشن ۵۱۲×۵۱۲ پیکسل و با ضخامت اسلایس ۵mm با استفاده از برنامه MATLAB تهیه شده در این تحقیق، به مدل وکسل بندی شده مستطیلی شکل، تبدیل شد.

نتایج و بحث

تأثیر تعداد سلولها و کارت PRDMP بر راندمان پردازش موازی

زمان اجرای موازی کد MCNPX بر روی Beowulf Cluster برای شبیه سازی مقدار دز در فانتوم آب وکسل بندی شده مذکور بدست آمد و فاکتور تسریع یا Speedup Factor برای موارد فوق محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در تمام حالتها تعداد ۱۰ میلیون فوتون شبیه سازی شده است. فاکتور تسریع به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Speedup factor } (n \text{ processors}) = \frac{\text{Time } (1 \text{ processor})}{\text{Time } (n \text{ processors})}$$



ب

الف

شکل ۱: نمودار فاکتور تسریع بر حسب تعداد پردازنده به کار رفته در شبیه سازی دز در فانتوم آب وکسل بندی شده با ابعاد cm^3 $30 \times 30 \times 30$ و تعداد وکسل متفاوت بر روی Beowulf Cluster با ۸۰ هسته محاسباتی (۱۰ میلیون ذره). الف) با مقادیر پیش فرض کارت PRDMP. ب) با تنظیم کارت PRDMP.

شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سلول‌ها، فاکتور تسریع به شدت کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۱-الف نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سلول‌ها، مقدار بهینه هسته‌های به کار رفته در پردازش موازی کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش حجم اطلاعات ارسالی بین گره‌ها است. شکل ۱-ب نشان می‌دهد که تنظیم مناسب کارت PRDMP فاکتور تسریع (راندمان) را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. برای نشان دادن تأثیر کارت PRDMP در افزایش سرعت محاسبات، بهترین نتایج زمانی این دو در جدول ۱ مقایسه شده است.

جدول ۱: نتایج زمانی پردازش موازی کد MCNPX بر روی Beowulf Cluster با ۸۰ هسته محاسباتی برای شبیه سازی دز در فانتوم آب وکسل بندی شده با تعداد وکسل متفاوت برای مقادیر پیش فرض و تنظیم مناسب کارت PRDMP (۱۰ میلیون ذره).

نسبت سرعت‌ها الف	زمان محاسبات (بر حسب دقیقه)		تعداد واکسل‌ها
	تنظیم کارت PRDMP	مقادیر پیش فرض کارت PRDMP	
۱/۵۲	۱/۰۵	۱/۶۰	۳۳
۲/۴۰	۱/۵۰	۳/۶۰	۱۰۳
۳/۹۶	۳/۸۷	۱۵/۳۲	۲۰۳
۴/۱۳	۱۵/۳۳	۶۳/۳۷	۳۰۳
۴/۲۲	۶۰/۵۵	۲۵۵/۵۸	۴۰۳

الف) نسبت سرعت‌ها = نسبت ستون دوم به ستون سوم

همان‌طور که در ستون چهارم (نسبت سرعت‌ها) این جدول مشهود است، تأثیر تنظیم کارت PRDMP در شبیه‌سازی‌های با تعداد سلول زیاد به مراتب بیشتر است به نحوی که در ردیف آخر، تنظیم این کارت، راندمان را بیش از چهار برابر افزایش داده است.

جدول ۲: مقایسه نتایج زمانی دو روش پردازش موازی کد MCNPX بر روی کلاستری ۸۰ هسته‌ای برای شبیه سازی دز در فانتوم آب وکسل بندی شده با ابعاد $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ و تعداد وکسل متفاوت (۱۰ میلیون ذره).

نسبت سرعت‌ها (ج)	اجرای چندگانه موازی همزمان بر روی MOSIX Cluster (ب)		پردازش موازی مرسوم بر روی Beowulf Cluster (الف)		تعداد واکسل‌ها
	Speedup Factor	زمان (دقیقه)	Speedup Factor	زمان (دقیقه)	
۱/۰۸	۷۸/۵	۰/۹۷	۷۲/۹	۱/۰۵	۳۳
۱/۱۶	۷۹/۰	۱/۱۶	۶۸/۲	۱/۳۵	۱۰۳
۱/۷۲	۵۲/۱	۲/۲۵	۳۰/۳	۳/۸۷	۲۰۳
۲/۷۳	۶۵/۷	۵/۶۲	۲۴/۱	۱۵/۳۳	۳۰۳
۴/۱۱	۵۱/۳	۱۴/۷۵	۱۲/۵	۶۰/۵۵	۴۰۳

الف) این نتایج با انتخاب بهینه تعداد هسته به کار گرفته شده (تعداد Task) بدست آمده است.

ب) این نتایج برای ۸ اجرای همزمان یک فایل ورودی با به کار گیری ۱۰ هسته برای هر یک بوده است.

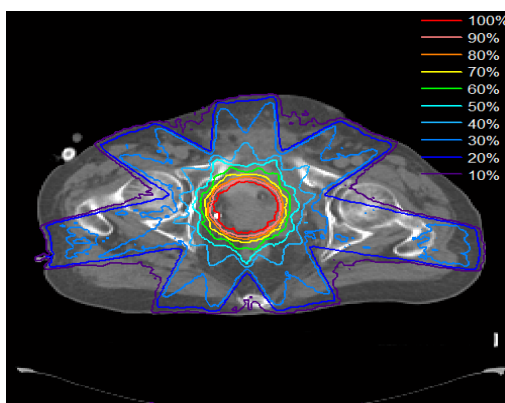
ج) نسبت سرعت‌ها = نسبت Speedup روش پیشنهادی به روش مرسوم است.

اجرای چندگانه موازی بر روی MOSIX Cluster

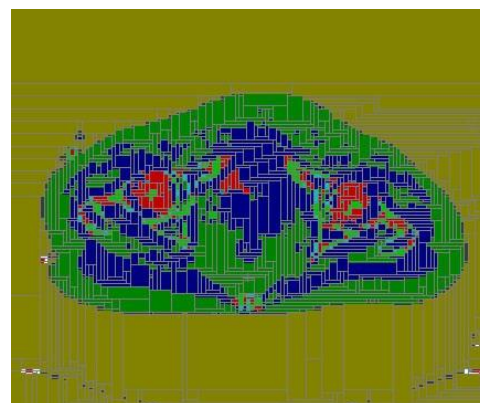
نتایج زمانی اجرای موازی کد MCNPX به روش پیشنهاد شده در این تحقیق بر روی MOSIX Cluster برای محاسبه توزیع دز در فانتوم آب مشابه مرحله قبل بدست آمد که نتایج آن به همراه نتایج روش قبل در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود فاکتور تسریع برای همه حالات‌ها، در روش دوم بیشتر از روش اول است. علی‌رغم تحقیقات پیشین که نشان داده‌اند فاکتور تسریع با افزایش تعداد پردازنده‌ها تقریباً به‌طور خطی تا حدود ده پردازنده، افزایش یافته و سپس به سرعت کاهش می‌یابد [۱۱]، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کارت PRDMP و روش پردازش موازی ارائه شده در این تحقیق این مشکل را به خوبی مرتفع می‌سازد.

نتایج زمانی محاسبه دز در طراحی درمان کلینیکی

در شکل ۲-الف، مدل وکسل‌بندی شده از یک نمونه سی‌تی پروستات نشان داده شده‌است که تعداد کل سلول‌ها برابر با ۵۴۶۳۷ بوده است. شکل ۲-ب توزیع دز حاصل از شبیه‌سازی یک طرح کانفورمال با استفاده از کد MCNPX را نشان می‌دهد. برای این محاسبه، ۱۷۵ میلیون ذره شبیه‌سازی شده که در آن میزان خطای نسبی برای همه‌ی وکسل‌ها با دوز بیشتر از نصف دز ماکزیمم ($D_{max}/2$)، حدود ۲٪ می‌باشد. زمان این شبیه‌سازی به صورت موازی به روش پیشنهادی و روش مرسوم، به ترتیب ۲/۳ ساعت و ۹/۲ ساعت به طول انجامیده است. شایان ذکر است زمان اجرای این برنامه در حالت غیر موازی حدود ۱۱۵ ساعت بوده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) مدل وکسل‌بندی شده یک اسلایس سی‌تی رسم شده توسط کد MCNP. ب) توزیع دز فوتون ۱۸ MeV پروستات در طرح درمان کانفورمال با ۷ میدان تابشی بدست آمده از روش مش تالی کد MCNPX (۱۷۵ میلیون ذره).



نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر تعداد سلول‌ها و تنظیم کارت PRDMP بر روی راندمان پردازش موازی کد MCNPX بررسی شد. نتایج نشان داد که راندمان پردازش موازی این کد با افزایش تعداد سلول‌ها به شدت کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که تنظیم کارت PRDMP برای کاهش زمان محاسبات به خصوص در تعداد سلول‌های بالا، بسیار مؤثر است به نحوی که در مسئله‌ای با تعداد ۶۴۰۰۰ سلول، تنظیم این کارت باعث افزایش راندمان تا بیش از چهار برابر گردید. علاوه بر این یک روش بسیار کارآمد برای پردازش موازی کد MCNPX در شبیه‌سازی مسائل با تعداد سلول زیاد به ویژه برای محاسبات دز در طراحی درمان مونت کارلو بر پایه تصاویر سی‌تی معرفی گردید. به کارگیری این روش در مقایسه با روش مرسوم پردازش موازی کد MCNP سرعت محاسبات را در مسئله‌ای با ۶۴۰۰۰ سلول بر روی کلاستری ۸۰ هسته‌ای بیش از ۳۰٪ افزایش داد.

مراجع

1. A. Mesbahi, et al "A comparative Monte Carlo study on 1MV photon beam characteristics of Varian 21EX and Elekta SL-20 linacs", Iran. J. Radiat. Res., 5(1): 23-30, (2007).
2. N. Jabbari, et al, "Evaluation of the electron energy fluence and angular distributions from a clinical accelerator:A BEAMnrc Monte Carlo study", Iran. J. Radiat. Res., 9(1): 29-36, (2011).
3. A. Mesbahi, "Radial dose functions of GZP1 intracavitary brachytherapy 60Co sources: treatment planning system versus Monte Carlo calculations", Iran. J. Radiat. Res., 5(4): 181-186, (2008).
4. T. Yamamoto, et al, "An integrated Monte Carlo dosimetric verification system for radiotherapy treatment planning", Phys. Med. Biol., 52: 1991-2008, (2007).
5. P. Schiapparelli, et al, "Dosimetric verification of a commercial Monte Carlo treatment planning system (VMC++) for a 9 MeV electron beam", Med. Phys., 36(5): 1759-1767, (2009)..
6. M. Momenzhad, et al, "A Monte Carlo simulation and dosimetric verification of physical wedges used in radiation therapy. Iran. J. Radiat. Res., 7(4): 223-227, (2010).
7. H. Ghiasi and A. Mesbahi, "Monte Carlo characterization of photoneutrons in the radiation therapy with high energy photons: a Comparison between simplified and full Monte Carlo models". Iran. J. Radiat. Res., 8(3): 187-193, (2010).
8. M. Allahverdi, et al "Monte Carlo estimation of electron contamination in a 18 MV clinical photon beam", Iran. J. Radiat. Res., 8(3): 187-193, (2011).
9. A. Barak and O. Laadan, "The MOSIX multicomputer operating system for high performance cluster computing", Future Gener. Comput. Sys., 13:361-372, (1998).
10. X Monte Carlo Team, "MCNPX User's Manual Version 2.4.0.", Los Alamos National Laboratory. Report LA-CP-02-408. U.S.A., (2002).
11. S.M. Robinson, et al, "Characteristics of multiprocessing MCNP5 on small personal computer clusters. J. Inst., Volume 1, Issue 06, P.6001, (2006).