

علاج سرطان الثدي بالتشعيع بحزمة من النيوترونات الحرارية و النانوتكنولوجيا

سامية كريم عباس
alkazalis@yahoo.com

نجم عبد عسكوري
na_phys@yahoo.com
جامعة الكوفة - كلية التربية للبنات

الخلاصة

شملت هذه الدراسة إحدى طرائق علاج الأورام التي تتال اهتماماً في الوقت الحاضر في معظم الدول المتقدمة، حيث من المعروف أنه لازالت الطرائق المتبعة سواء أكانت جراحية أم كيميائية أم إشعاعية لا تفي بالغرض في حالات كثيرة من الأورام. أن الهدف من الدراسة الحالية هو معالجة سرطان الثدي باستخدام النيوترونات الحرارية منخفضة الطاقة بطاقة (0.025 eV) وتقنية النانوتكنولوجيا باستخدام جسيمات البورون النانوية بأوزان مختلفة وخلال حقبة زمنية معينة، بحيث تحافظ على شكل الثدي وكذلك تمنع خطر تكرار الإصابة بسرطان الثدي مرة أخرى وذلك بأسلوب أعطاء أقل جرعة للمريض.

أن هذا العمل يفحص عدة عوامل فيزيائية تخص فعالية استخدام البورون كمادة نانوية لتحسين العلاج بالإشعاع، فالعوامل الفيزيائية تتضمن مقدار الفيض للنيوترونات الحرارية الساقطة، ومدة التعرض للإشعاع، ووزن مادة البورون النانوية، ومقدار طاقة النيوترونات الحرارية الساقطة.

استخدم في هذا البحث البورون كمادة نانوية بأوزان مختلفة وهي: (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) ng، وكل وزن يتفاعل مع النيوترونات الحرارية التي طاقتها (0.025 eV)، ويكون التشعيع لحقبة زمنية مقدارها (1800) s، مع تثبيت العوامل الأخرى.

أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في الجرعة المستلمة وتمثل هذا التحسن بزيادة عدد الخلايا السرطانية المدمرة. أن الزيادة في عدد الخلايا السرطانية المدمرة بوجود مادة البورون النانوية ناتجة عن سببين:

الأول: التراكم الانتقائي لذرات البورون ^{10}B المستقر في خلايا الورم فقط وليس النسيج السليم.

الثاني: نزع نوى البورون ^{10}B لأسر النيوترونات الحرارية بطاقة (0.025 eV)، فتنتج من هذا التفاعل النووي نوى البورون ^{11}B غير المستقر، فينتج عنها ناقل الطاقة الخطي (LET) العالي المتمثل بجسيمة ألفا بطاقة (1.47 MeV) ونواة الليثيوم ^7Li (المرتدة بطاقة 0.84 MeV) بالإضافة إلى فوتون غاما بطاقة (0.48 MeV) إذ يكون لطاقة الجسيمتين فضلاً عن حركتهما بمدى قصير بحدود (5-9 μm) ضمن النسيج وهو مقارب لقطر الخلايا، وانتشارها باتجاهين متعاكسين الأثر الفعال في تحطيم سلسلة (DNA) المسؤولة عن إعادة إنتاج الخلايا الجديدة، وبهذا يكون احتمال تدمير الخلايا السرطانية عالي.

الكلمات المفتاحية: علاج أسر نيوترون بورون (BNCT)، سرطان الثدي، النيوترونات الحرارية، البورون، النانوتكنولوجيا.

Treating Breast Cancer by Radiation with a Fluence of Thermal Neutrons & Nanotechnology

Najim Abed Askouri

Samia Karim Abbas

Abstract

In this study we mention one of the treatments to cure cancer. It is considered one of the promising methods nowadays. It includes the use of Boron as a nano material to improve the radiation sensitivity inside the breast. These are treated with low energy thermal neutrons (0.025 eV) resulting in high alpha linear energy transporter and Lithium nucleus ^7Li in addition to Gamma photon with (0.48 MeV). The energy of these products (2.31 MeV) which destroy the cancer cells in the tissue.

This treatment checks several physical factors related to the effectively of using Boron to improve the treatment with radiation. The physical factors include the amount of the falling thermal neutrons and the time of exposure and the concentration of the nano Boron material and the amount of the falling thermal neutrons. In this study the concentrations of used nano Boron were (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) ng, and each concentration was a target for the thermal neutrons of (0.025 eV) energy interaction. The times of exposure (1800) s, while the other factors were kept fixed.

The results showed a great improvement in the received dose and improvement in the number of the destroyed cancer cells. The increase is due to two reasons:

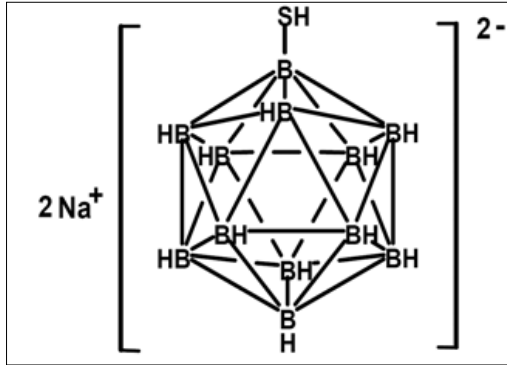
First: the selective accumulation of stable ^{10}B in the cells of the tumor only and not the healthy tissue.

Second: ^{10}B tendency towards thermal neutrons (0.025 eV) interaction. The resultant from this interaction is unstable ^{11}B causing the production of high linear energy transporter represented by alpha particle (1.47 MeV) and ^7Li nucleus (0.84 MeV), as well as Gamma photon (0.48 MeV). The energy of both products is deposited within (5-9 μm) of the tissue which is close to the cells diameter and it spreads in two opposite directions in destroying the DNA chain responsible for regenerating new cells, therefore, the possibility of destroying cancer cells is high.

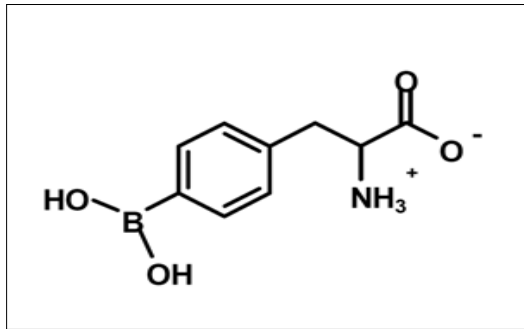
Key words: Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Breast Cancer, Thermal Neutrons, Boron, Nanotechnology.

ومن المركبات التي تستخدم في علاج الأمراض السرطانية باستخدام علاج أسر نيوترون بورون (BNCT)

هي (Sodium Borocaptate) (BSH) ورمزه الكيميائي $(Na_2B_{12}H_{11}SH)$ و
(Boronophenylalanine) (BPA) ورمزه الكيميائي $(C_9H_{12}BNO_4)$ [14].



الشكل رقم (2) التركيب الكيميائي لمركب BSH [15].



الشكل رقم (3) التركيب الكيميائي لمركب BPA [15].

تستحضر الجزيئات النانوية للبورون بقطر (10 – 150 nm) من التحلل الحراري لطور الغاز لبخار (Decaborane) تحت ضغط (1 atm) ودرجة حرارة $(700 - 900 ^\circ C)$ [16].

هناك ثلاثة عوامل مهمة لنجاح علاج أسر نيوترون بورون (BNCT) وهي التوزيع الحيوي (Biodistribution) للبورون ^{10}B في حقبة زمنية معينة، و فيض النيوترون الحراري (Thermal Neutron Flux) مع توزيع طاقة معينة، والاعتناء بموقع المجموعة الذي يجمع حقل النيوترون الحراري والتوزيع الحيوي للبورون سوية بشكل مثالي، ومن ثم فإن تأثير العلاج المطلوب تكتسب في الموقع الصحيح [17].

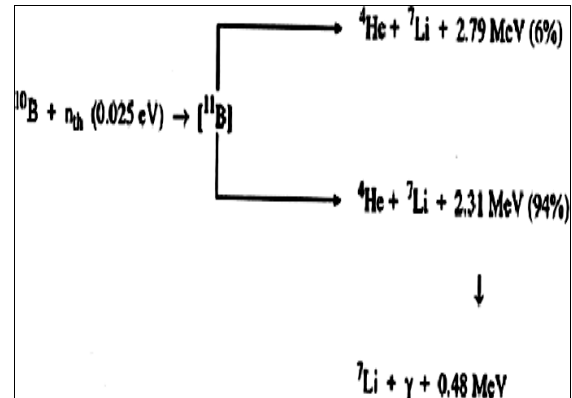
Introduction

1- المقدمة

علاج أسر نيوترون بورون (Boron Neutron Capture Therapy) (BNCT) هو علاج بالأشعة الذي يستهدف السرطان بالمستوى الخلوي مع إشعاع ناقل الطاقة الخطي (LET) العالي (The High Linear Energy Transfer) جسيمة ألفا ونواة الليثيوم 7Li المرتدة [1,2].

فهو وسيلة علاجية مزدوجة التي تتضمن التراكم الانتقائي (The Selective Accumulation) لذرات البورون ^{10}B المستقر في خلايا الورم فقط وليس النسيج السليم، يتبعه التشعيع بشعاع النيوترون الحراري (Thermal Neutron) وتوجيهه نحو الورم [3,4,5].

ينشأ علاج أسر نيوترون بورون (BNCT) عن نزعة نوى البورون ^{10}B لأسر النيوترونات الحرارية منخفضة الطاقة (0.025 eV)، فتنتج نوى البورون ^{11}B غير المستقر، وينتج عنها ناقل الطاقة الخطي (LET) العالي جسيمة ألفا ونواة الليثيوم 7Li المرتدة فضلاً عن إشعاع غاما (0.48 MeV) مع طاقة حركة الجسيمتين الكلية (2.31 MeV) تقريباً [6,7].



الشكل رقم (1) معادلة أسر نيوترون بورون [8].

يشتت ناقل الطاقة الخطي (LET) العالي طاقة الجزيئات قبل وصولها المقطع بمدى حوالي $(5-9) \mu m$ تقريباً ضمن النسيج، وهو مقارب لقطر الخلايا والمعروف بتأثيره الحيوي النسبي (RBE) العالي (The High Relative Biological Effectiveness) [9,10]، لذا فإن 80% من طاقه التفاعل النووي هو محصور داخل الخلية التي تحتوي بورون أسر نيوترون [11].

تعد حزمة النيوترونات الحرارية مصادر مناسبة لاستخدام علاج الأسر نيوترون بورون (BNCT) [8]، فهي قادرة على إنتاج ضرر قاتل فقط لخلايا الورم التي تحمل عدد كافٍ من نوى البورون ^{10}B من دون ضرر هام للأنسجة السليمة المجاورة [13].

$$N_d = \varphi t N_i \left(\left(\frac{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \rho A}{N_A} \right)_{breast} + \left(\frac{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \rho A}{N_A M} \right)_{boron} \right) \dots (4)$$

وذلك لعلاج سرطان الثدي بالتشعيع بحزمة من النيوترونات الحرارية منخفضة الطاقة التي طاقتها (0.025 eV)، إذ أفترض الفيض النيوتروني المستخدم (10^{12} neutrons/cm².s)، وذلك بعدما يحقن الورم في الثدي الذي كثافته (0.960 g/cm³)، ومعدل العدد الكتلي له (9.673)، ومعامل امتصاصه الكتلي عند طاقة النيوترونات الحرارية (0.0268 cm²/g)، بأحد المركبات الحاملة للجسيمات النانوية للبورون الذي كثافته (2.34 g/cm³)، وعدده الكتلي (10.811)، ومعامل امتصاصه الكتلي عند طاقة النيوترونات الحرارية (0.4 cm²/g)، إذ تمتص خلايا الورم السرطانية جسيمات البورون النانوية بسبب صفة الانتقائية لمادة البورون وبذلك تتفاعل النيوترونات الحرارية منخفضة الطاقة مع العديد من الأوزان المختلفة لجسيمات البورون النانوية وهي كالآتي: (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) ng، ويكون التشعيع في حقبة زمنية مقدارها (1800)s مع تثبيت العوامل الأخرى [18,19,20,21].

4- النتائج Results

بعد إجراء الحسابات النظرية حصلنا على مجموعة من النتائج تم جدولتها في الجدول رقم (1) والتي تم رسمها بمنحني بياني كما موضح في الشكل رقم (4) الذي يبين عدد الخلايا السرطانية المقتولة وعلاقتها بالجرعة الإشعاعية المستلمة من خلايا الورم.

2- معادلة التشعيع The Equation of Irradiation

أن معادلة التشعيع تعطى بالعلاقة التالية:

$$N_d = \varphi \times t \times N_i \times \sigma \dots\dots (1)$$

إذ أن :-

N_d : عدد خلايا السرطان المدمرة بعد التشعيع.

φ : فيض النيوترونات بوحدات (neutrons/cm².s).

t : زمن التعرض للإشعاع بوحد (s).

N_i : العدد الابتدائي لخلايا السرطان لكل وحدة حجم قبل التشعيع.

σ : المقطع العرضي لتفاعل النيوترونات مع المادة.

وبما أن :-

$$\sigma = \frac{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \rho A}{(N_A M)} \dots\dots\dots (2)$$

إذ أن :-

μ : معامل التوهين الخطي (Linear Attenuation Coefficient) بوحد (cm⁻¹).

ρ : الكثافة بوحدات (g/cm³).

A : العدد الكتلي.

N_A : عدد أفوكادرو (Avogadro's Number).

M : الكتلة بوحد (g).

تصبح العلاقة (1) بالشكل الآتي :

$$N_d = \varphi t N_i \frac{((\mu/\rho)\rho A)}{(N_A M)} \dots (3) \quad (18)$$

3- الحسابات Calculation

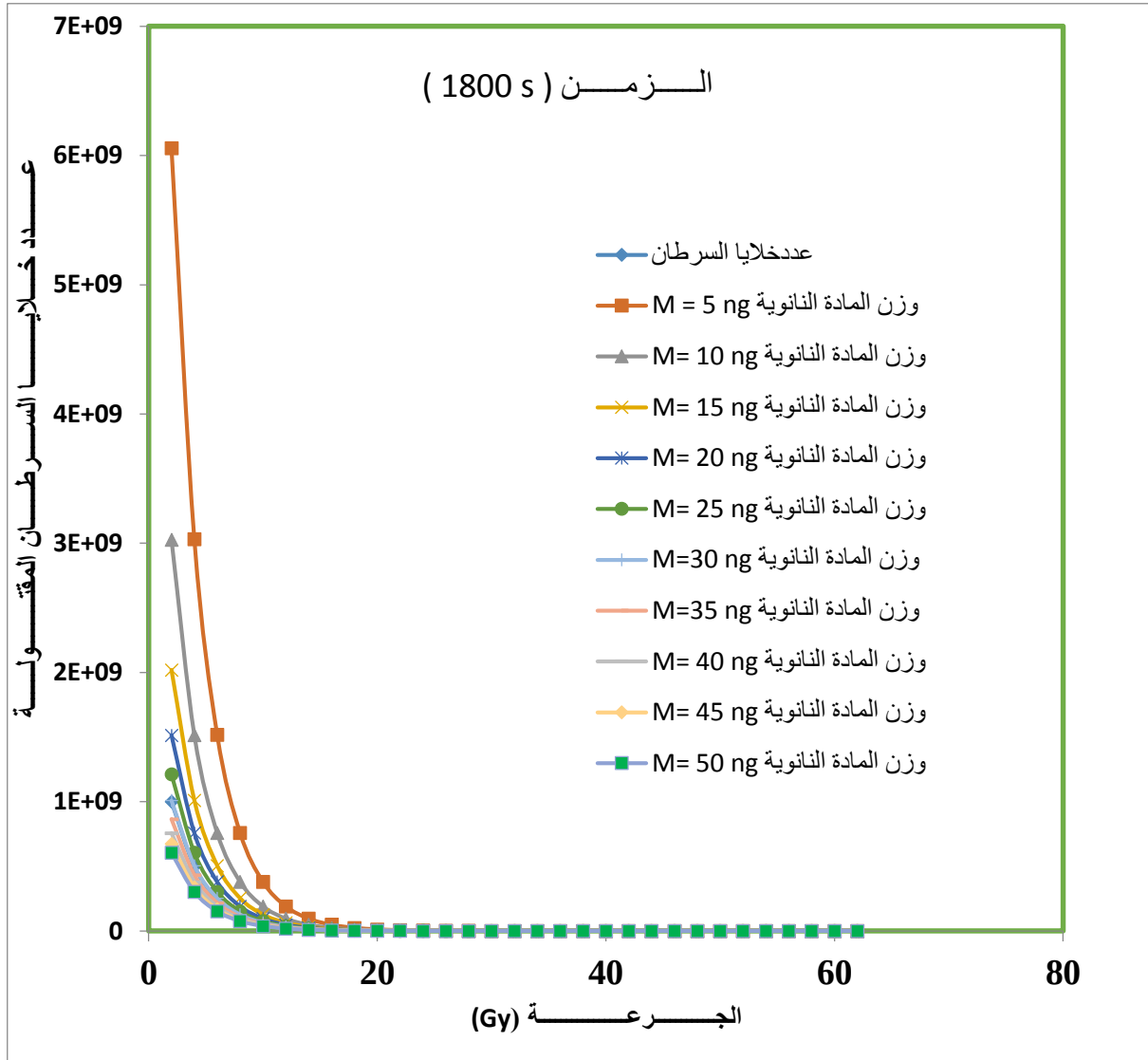
استخدام البرنامج الحاسوبي (MATLAB R2008a)، لإجراء الحسابات الخاصة بهذا العمل وبتطبيق المعادلة (3)، وبعد حقن المادة النانوية في الثدي يقسم المقطع العرضي على قسمين : وهما المقطع العرضي للثدي، والمقطع العرضي للبورون.

إذ تستخدم المعادلة بالشكل الآتي :

الجدول رقم(1) عدد خلايا السرطان المقتولة باستخدام جسيمات البورون النانوية بالأوزان : (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) ng ، والتشعيع بحزمة من النيوترونات الحرارية بفيض $\Phi=10^{12}$ neutron/cm².s ، والزمن t=1800 s

عدد خلايا السرطان المقتولة										عدد خلايا السرطان	نسبة (%)
M=50 ng	M=45ng	M=40 ng	M=35ng	M=30 ng	M=25 ng	M=20 ng	M=15 ng	M=10 ng	M=5 ng		
6056083	6285148	7395541	8659482	10027621	12113205	15391581	20185342	302780162	60560823	1000000	2
3083063	33811736	37913203	43048661	50521704	60661125	75826406	101045208	151552811	30830663	5000000	4
15179254	16899171	18967067	21670363	25888736	30848807	37948134	50597512	78896288	151792536	25000000	6
7986713	8496348	9446991	10809990	12694622	15191346	18891782	25189048	37983365	79867129	12500000	8
3821980	4246611	4752747	54817071	6389916	7604899	98054874	12673882	190109747	38219495	6250000	10
1902796	2114751	2390995	27189709	31721327	386698	47381991	6342654	9516981	19027963	3125000	12
9527321	10585913	11909152	13610459	15878869	19054643	23818304	31757738	47636607	95273214	1562500	14
4769129	5299032	5961411	6813041	7948548	9538257	11922822	15897095	23845643	47691286	7823500	16
2387301	2652557	2984127	3410431	3978836	4774603	5968254	7957671	11936507	23873014	3906250	18
1195021	1327801	1493776	1707173	1991701	2390042	2987552	3983403	5975104	11950208	1953125	20
598196	664663	747745	854566	996994	1196393	1495491	1993988	2990981	5981963	976562	22
299441	332713	374302	427773	499069	598883	748604	998138	1497207	2994414	488281	24
149893	166547	187366	214132	249821	299785	374731	499642	749463	1498926	244140	26
75032	83369	93790	107189	125054	150065	187581	250108	375162	750323	122070	28
37559	41732	46949	53656	62599	75118	93898	125197	187796	375592	61035	30
18801	20890	23501	26859	31335	37602	47003	62671	94006	188012	30517	32
9411	10457	11764	13445	15686	18823	23528	31371	47057	94114	15258	34
4711	5235	5889	6730	7852	9422	11778	15704	23555	47111	7629	36
2358	2620	2948	3369	3930	4716	5896	7861	11791	23582	3814	38
1180	1312	1476	1686	1967	2361	2951	3935	5902	11805	1907	40
591	657	739	844	985	1182	1477	1970	2955	5909	953	42
296	329	370	423	493	592	739	986	1479	2958	476	44
148	165	185	212	247	296	370	494	740	1481	238	46
74	82	93	106	124	148	185	247	371	741	119	48
37	41	46	53	62	74	93	124	186	371	59	50
19	21	23	27	31	37	46	62	93	186	29	52
9	10	12	13	15	19	23	31	46	93	15	54
4	5	6	7	8	9	12	16	23	47	7	56
2	2.5	3	3.3	4	5	6	8	12	23	4	58
1	1.2	1.5	1.7	2	2.4	3	4	6	12	2	60
0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.4	2	3	6	1	62

الشكل رقم (4) عدد خلايا السرطان المقتولة باستخدام جسيمات البورون النانوية بالأوزان : (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) ng، والتشعيع بحزمة من النيوترونات الحرارية بفيض $\Phi=10^{12}$ neutron/cm².s، والزمن t=1800 s.



التفاعل الالكترونات والبوزترونات بعملية إنتاج الزوج الالكتروني بطاقات حركية عالية والتي بدورها تؤدي إلى زيادة في إنتاج الجذور الحرة التي تدمر الخلايا السرطانية [18].

Conclusion

6- الاستنتاجات

أن الفرضية الرئيسة والمهمة في هذه الدراسة هي استخدام جسيمات البورون النانوية مع النيوترونات الحرارية في معالجة سرطان الثدي عملت على تطوير هذا العمل. إذ أن المادة النانوية توزع نفسها في خلايا الورم المستهدف، بينما تؤدي هذه الفرضية إلى نتائج تكون كافية لتوضيح آليات التفاعل العامة والمتغيرات الرئيسة، وعرض تفصيلي هو ضروري لانجاز الدقة الكافية سريرياً.

أن النتائج التي يوضحها الجدول رقم (1) تؤدي إلى الاستنتاج بأن الوزن المنخفض لجسيمات البورون النانوية مع طاقة النيوترونات الحرارية يجب أن تكون الاختيار الأمثل إلى تحسين العلاج بالأشعة لمعالجة سرطان الثدي.

أن الغرض الرئيس من استخدام بيانات هذه الدراسة هو زيادة عدد خلايا السرطان المقتولة، أي تحسين العلاج بالأشعة لمعالجة سرطان الثدي. أن كمية البيانات المتوفرة تساعد في تحقيق عملي مستقبلي داخل الجسم، وهي كافية لتحفيز التحقيق إلى استخدام البورون مع النيوترونات بطاقات أعلى وكعامل مقارنة هو التحسس الإشعاعي.

References

المصادر

- [1] G. Gambarini, G. Bartesaghi, J. Burian, M. Marek, A. Negri, L. Pirola and L. Viererbl, "Fast-Neutron Dose Evaluation in BNCT with Fricke Gel Layer Detectors", Radiation Measurements, Vol. 45, p: 1398-1401, (2010).
- [2] R. F. Barth, W. Yang, D. M. Adams, J. H. Rotaru, S. Shukla, M. Sekido, W. Tjarks, R. A. Fenstermaker, M. Ciesielski, M. M. Nawrocky and J. A. Coderre, "Molecular Targeting of The Epidermal Growth Factor Receptor for Neutron Capture Therapy of Gliomas", Cancer Research, Vol. 62, p: 3159-3166, (2002).
- [3] E. C. C. Pozzi, J. E. Cardose, L. L. Colombo, S. Thorp, A. M. Hughes, A. J. Molinari, M. A. Garabalino, E. M. Heber, M. Miller, M. E. Itoiz, R. F. Aromando, D. W. Nigg, J. Quintana, V. A. Trivillin, A. E. Schwint, "Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Liver Metastasis: Therapeutic Efficacy in an Experimental Model", Radiat Environ Biophys, Vol. 51, p: 331-339, (2012).
- [4] M. R. M. Solleh, A. A. Tajuddin, A. A. Mohamed, E. M. E. Abdel-Munem, M. H. Rabir, J. A. Karim and K. Yoshiaki, "Collimator and Shielding Design for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Facility at

Discussion

5- المناقشة

سيتم مناقشة النتائج من الحسابات النظرية مع أعطاء الأهمية الخاصة للحساسية الإشعاعية بالاعتماد على طاقة النيوترونات ووزن الجسيمات النانوية للبورون. أظهرت نتائج هذا العمل تأييد للدراسات المنشورة ويوسع كمية البيانات التحليلية المتوفرة لتوجيه العمل المستقبلي. إذ يستند هذا العمل على فكرة تحسين الجرعة المستلمة بالاعتماد على النتائج التي تم الحصول عليها وذلك بعد تطبيق المعادلة (4) على الثدي بعد حقنه بمركب يحتوي جسيمات البورون النانوية، وبمعنى آخر، تحسين المقطع العرضي للثدي. فالتحسن في الجرعة المستلمة في مواقع ورم السرطان مثلت بالزيادة في عدد خلايا السرطان المقتولة في الورم كما هو مقارن بعدد خلايا السرطان المقتولة في الورم من دون جسيمات البورون النانوية في الجرعة نفسها.

يبين الجدول رقم (1) أن عدد خلايا السرطان المقتولة للحقبة الزمنية نفسها في الوزن المنخفض لجسيمات البورون النانوية أكثر من عدد خلايا السرطان المقتولة في الوزن العالي لجسيمات البورون النانوية أي ينتج تحسين الجرعة في موقع الورم، وهذه النتيجة بسبب الوزن المنخفض للبورون إذ يكون لجسيماته حجماً صغيراً جداً (Nanosize) لذلك يمكنها أن تدخل داخل الخلية السرطانية بسهولة وتوزع في السايوبلازم (Cytoplasm)، وبذلك فإن التفاعل سوف يحدث داخل الخلية مما يؤدي إلى قتلها.

حددت هذه الدراسة أفضل وزن لجسيمات البورون النانوية التي ينتج عنها التحسين الأقصى للعلاج بالأشعة لمعالجة سرطان الثدي أي تعطي أقصى عدد من خلايا السرطان المقتولة وبمعنى آخر الطلقة الوحيدة (Single shot) للمعالجة بدلاً من تجزئة الجرعة، وكما يلاحظ من الجدول رقم (1) أن أفضل وزن أستخدم في حساباتنا لجسيمات البورون النانوية الذي يتفاعل مع النيوترونات الحرارية بطاقة (0.025 eV) في نفس الحقبة الزمنية التي تتعرض فيها خلايا الورم السرطاني للإشعاع هو (5 ng) ثم تأتي بعده باقي الأوزان المستخدمة تصاعدياً (20 ng), (15 ng), (10 ng), (25 ng), (30 ng), (35 ng), (40 ng), (45 ng), (50 ng).

أن التحسين الأقصى للعلاج يمكن أن يرى بشكل واضح عندما يتفاعل وزن جسيمات البورون النانوية مع النيوترونات الحرارية منخفضة الطاقة عندما يتعرض المريض لأشعة النيوترونات الحرارية بطاقة (0.025 eV)، إذ يتولد أثناء التفاعل ناقل الطاقة الخطي (LET) العالي جزيئة ألفا ونوى الليثيوم ^7Li المرتدة فضلاً عن إشعاع غاما (0.48 MeV) مع طاقة حركة الجسيمتين (2.31 MeV) تقريباً، الذي يسبب الضرر في خلايا السرطان مما يؤدي إلى الزيادة في تحسين الجرعة.

إن النتائج التي حصلنا عليها من هذه الدراسة النظرية هي مقارنة للنتائج التي تم الحصول عليها من الدراسة النظرية التي أجراها الباحث طالب عبد الرضا عبد الواحد في عام 2012 م التي تمت فيها معالجة سرطان الثدي بالإشعاع بطريقة تتضمن استعمال مادة الذهب كمادة نانوية لتحسين التحسس الإشعاعي داخل الثدي، إذ يتم تشعيع جسيمات الذهب النانوية بفوتونات أشعة غاما ذات الطاقة العالية فينتج من هذا

- Itoiz, R. F. Aromando, J. Quintana, V. A. Trivillin and A. E. Schwint, "Dosimetry and Radiobiology at The New RA-3 Reactor Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Facility: Application to The Treatment of Experimental Oral Cancer", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67, p: S309-S312, (2009).
- [13] L. Menichetti, L. Gaetano, A. Zampolli, S. D. Turco, C. Ferrari, S. Bortolussi, S. Stella, S. Altieri, P. A. Salvadori and L. Cionini, "In Vitro Neutron Irradiation of Glioma and Endothelial Cultured Cells", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67, p: S336-S340, (2009).
- [14] M. Alotiby, "Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments", M.Sc. Thesis, Surrey University, (2012).
- [15] V. A. Nievaart, "Spectral Tailoring for Boron Neutron Capture Therapy", Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, (2007).
- [16] B. J. Bellott, W. Noh, R. G. Nuzzo and G. S. Girolami, "Nanoenergetic Materials: Boron Nanoparticles from The Pyrolysis of Decaborane and their Functionalisation", *The Royal Society of Chemistry*, p: 3214-3215, (2009).
- [17] M. Kortensniemi, "Solutions for Clinical Implementation of Boron Neutron Capture Therapy in Finland", *Report Series in Physics*, Helsinki University, (2002).
- [18] T. A. Abed Al-Wahid, "Treatment of Breast Cancer by Gamma Photons Irradiation and Nanotechnology", M.Sc. Thesis, Kufa University, (2012).
- [19] W. E. Meyerhof, "Elements of Nuclear Physics", McGraw-Hill Book Company, Inc., (1967).
- [20] J. Webster, "Encyclopedia of Medical Device and Instrumentation", 2nd Edition, Vol. 5, A John Wiley and Sons Inc. Publication, (2006).
- [21] B. Schillinger, T. München, E. Lehmann and P. Villigen, "Neutron Computed Tomography as an Industrial Tool", *Computerized Tomography and Image Processing*, Vol. 67, p: 83-86, (1999).
- TRIGA MARK II REACTOR", *Journal of Nuclear and Related Technologies*, Vol. 8, No. 2, p: 41-48, (2011).
- [5] R. F. Barth, W. Yang, G. Wu, M. Swindall, Y. Byun, S. Narayanasamy, W. Tjarks, K. Tordoff, M. L. Moeschberger, S. Eriksson, P. J. Binns and K. J. Riley, "Thymidine Kinase 1 as A Molecular Target for Boron Neutron Capture Therapy of Brain Tumors", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 105, No. 45, p: 17493-17497, (2008).
- [6] A. M. Hughes, E. C. C. Pozzi, E. M. Heber, S. Thorp, M. Miller, M. E. Itoiz, R. F. Aromando, A. J. Molinari, M. A. Garabalino, D. W. Nigg, V. A. Trivillin and A. E. Schwint, "Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) in an Oral Precancer Model: Therapeutic Benefits and Potential Toxicity of A Double Application of BNCT with A Six-Week Interval", *Oral Oncology*, Vol. 47, p: 1017-1022, (2011).
- [7] C. F. Chiojdeanu, C. Pavel and F. Constantin, "Boron Neutron Capture Therapy Setup for A Linear Accelerator", *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 54, Nos. 7-8, p: 641-648, (2009).
- [8] L. Yasui, T. Kroc, S. Gladden, C. Andorf, S. Bux and N. Hosmane, "Boron Neutron Capture in Prostate Cancer Cells", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 70, p: 6-12, (2012).
- [9] S. Sumitani, M. Oishi, T. Yaguchi, H. Murotani, Y. Horiguchi, M. Suzuki, K. Ono, H. Yanagie and Y. Nagasaki, "Pharmacokinetics of Core-Polymerized, Boron-Conjugated Micelles Designed for Boron Neutron Capture Therapy for Cancer", *Biomaterials*, Vol. 33, p: 3568-3577, (2012).
- [10] S. Miyatake, S. Kawabata, K. Yokoyama, T. Kuroiwa, H. Michiue, Y. Sakurai, H. Kumada, M. Suzuki, A. Maruhashi, M. Kirihata and K. Ono, "Survival Benefit of Boron Neutron Capture Therapy for Recurrent Malignant Gliomas", *Journal of Neuro-Oncology*, Vol. 91, No. 2, p: 199-206, (2009).
- [11] V. Byvaltsev, V. Kanygin, E. Belykh and S. Taskaev, "Prospects in Boron Capture Therapy of Brain Tumors", *World Neurosurgery*, Vol. 78, Nos. 1-2, p: 4-9, (2012).
- [12] E. Pozzi, D. W. Nigg, M. Miller, S. I. Thorp, E. M. Heber, L. Zarza, G. Estryk, A. M. Hughes, A. J. Molinari, M. Garabalino, M. E.