The Libyan Journal of Science (An International Journal): Volume 23, 2020.

الموصلية والسماحية الكهربية لأنسجة الكلى المشعة
Conductivity and Permittivity of Irradiated Rats' Kidney Tissue

عالية محمد الشريف[1]، أحمد محمد الحاج[2]، خالد عبد الحفيظ المرغني[3] و أحمد إمحمد الحماصي[4]

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة طرابلس

[1]ali.alshrif@uot.edu.ly; [2]ah.elhaj@uot.edu.ly; [3]k.marghani@uot.edu.ly; [4]a.elhmassi@uot.edu.ly

المستخلص

ازدات اهمية دراسة الخصائص الكهربية للأنسجة المشعة في العلاج الاشعاعي حيث الجرعة الفعالة وزمن التشعيع يسهم مباشرة في علاج الأورام. كما ان لها أهمية في تحديد درجة الضرر والذي يساعد في عملية التشخيص وبالتالي العلاج الناجع. في هذه الورقة تم دراسة الخصائص الكهربية وتأثير الاشعاع على انسجة الكلي للجرذان في مدي ترددات (300 Hz – 5 MHz)، بالنسبة للمجموعة الاولى من خلال تعريض الجسم كله لجرعة (4 Gy) واجريت القياسات فى فترات زمنية محددة (2, 4, 16, 30 days) بعد التشعيع وكذلك بالنسبة للمجموعة الثانية من خلال تعرضها لجرعات مختلفة ومحددة (6 Gy – 0.5). تم حساب الموصلية والسماحية لكل العينات ودراسة كدالة فى الزمن او الجرعة الاشعاعية. أظهرت النتائج بان التغيرا فى قيمة الموصلية بين الانسجة المشعة وغير المشعة للفترات الزمنية بعد التشعيع قد ازدادت فى اليوم الثاني والرابع، ثم نقصت واقتربت من قيمة الموصلية للانسجة غير المشعة فى اليوم السادس عشر وأخيراً ازدادت قليلا فى اليوم الثلاثين. وايضا ازدادت قيمة الموصلية تدريجيا بزيادة الجرعات لتكون عند الجرعة (6 Gy) قد ازدادت بمقدار (0.0429 S/m) عن قيمتها فى الانسجة غير المشعة. اما بالنسبة للسماحية النسبية فان اطياف منحنيات السماحية النسبية تظهر تغييرا طفيفا جدا عند اليوم الثانى والرابع ثم يختفى بقية الايام وكذلك يلاحظ تغييرا طفيفا جدا فى قيمة السماحية النسبية بزيادة الجرعات الاشعاعية وهو فرق غير ذو قيمة احصائية بين الانسجة المشعة وغير المشعة. ان هذا يعنى ان تاثير الاشعاع على أنسجة الكلى لا تظهر تغير منتظم و واضح في فترات مختلفة بعد التشعيع حتى (30 يوم) وثبت لدينا بان ضررالغشاء الخلوى لا يظهر في الجرعات المنخفضة للإشعاع التي لا تتجاوز (6 Gy) عند تشعيع الجسم ككل.

الكلمات المفتاحية: الجرعة الاشعاعية; الموصلية; السماحية; انسجة الكلى; والزمن.

Accepted for Publication: 19/11/2020

Abstract

It is important to understand the respond and behavior of tissues to bioelectric properties, after their exposure to radiation. The knowledge of these properties is useful to determine the degree of damage, and therefore, help in medical diagnosis that leads to effective therapy. In this paper, the conductivity, relative permittivity and radiation effects on rat's kidney tissue is studied over a frequency range from 300 Hz to 5 MHz. The studied objects were exposed to an x-ray which provided a dose of (0.5 – 6 Gy). This was carried over a different time period extend from 2 days to 30 days. The results showed that the conductivity due to irradiation increases in the second and fourth day. Then, it dropped to the value of the non-irradiated tissue in the sixteenth day and once more showed some increase after 30 days. Furthermore, the conductivity showed increase in value as a function of dose rate. The difference in conductivity reached 0.0429 S/m at a dose of 6 Gy with respect to non-irradiated tissue. However, the relative permittivity did not show any major fluctuations as a function of dose and time variation. The effect of radiation on kidney's tissue does not show a consistent change during different time after irradiation. Also, the damage on the external cells of tissue does not occur at low radiation (< 6 Gy) which is in agreement with other studies [18,19,20].

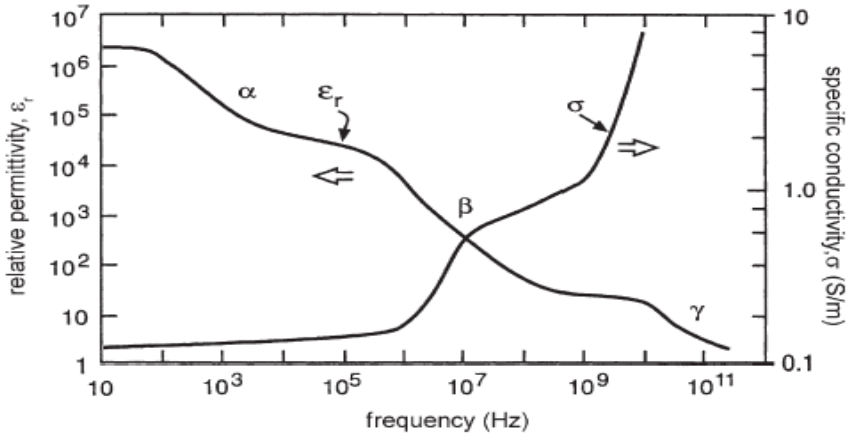
Keywords: Biomedical Impedance; Conductivity; Permittivity; Kidney Tissues and Radiation.

مقدمـة

يؤثر الاشعاع على مكونات الانسجة الحية ويتسبب فى تلف الانسجة اللحمية والاوعية الدموية وتعتمد شدة الاضرر على مقدار الجرعات والفترات الزمنية للتعرض للاشعاع [1,2] . وتكشف بعض الدراسات امكانية استخدام التحليل الطيفى للمعاوقة الكهربية فى دراسة ومراقبة تطور اصابة الانسجة التى سببها التعرض للاشعاع وتصبح دراسة الخصائص الكهربية عوامل مهمة فى تقيم نسبة الضرر و بالتالي العلاج كما فى حالات الاورام. ان الانسجة الحية لها مقاومة كهربية تعتمد على التردد ونوع الانسجة , وبالتالى فان طيف المعاوقة الكهربية هى دالة فى التردد يمكن استخدامها للتميز بين الانسجة الطبيعية والمتضرر [3,4,5,6]. يتم تحديد الخصائص الكهربائية للأنسجة بدراسة السلوك الكهربائي للمكونات والسوائل داخل وخارج الخلية التى تحتوي على أيونات ويمكن لهذه الأيونات التحرك بحرية والقدرة على نقل شحنة كهربائية؛ لذلك يمكن اعتبار الأنسجة البيولوجية موصل أيوني في الترددات المنخفضة. يعمل غشاء الخلية الكهربائيا على عزل الخلية، وبالتالي يتم إنشاء بنية (الموصل– العازل – الموصل). ان الأيونات الأكثر شيوعا في السائل خارج الخلية هي أيون الصوديوم والكلور، أمّا أيون البوتاسيوم لديه أعلى تركيز في السوائل داخل الخلايا، ووجود شحنات حرة التحرك في كلا الجانبين من غشاء الخلية يسمح بتراكم الشحنات على طرفي الغشاء فتثير خصائص عازلة [4,7].

في الأنسجة الحية كلا من السماحية permittivity والموصلية conductivity تعتمدان على التركيب الحيوي وحالة الوسط وعلى التردد ، فعند تردد اقل من 100 Hz فان السماحية النسبية relative permittivity تكون ما بين – 10^6

و 10^7 وتقل بزيادة التردد فى ثلاث مناطق تشتت رئسية ($\boldsymbol{\alpha}$ ، $\boldsymbol{\beta}$ ، $\boldsymbol{\gamma}$) كما بالشكل 1 وتعرف هذه المناطق بنوافذ التشتت وهي تستند أساسا على الخصائص الكهربائية للمواد الحيوية وهي ذاتها تعتمد على التردد.



شكل 1. مناطق التشتت الرئيسة للموصلية والسماحية [11].

ففى منطقة تشتت α تعزى الى عملية الانتشار الأيونى عند الغشاء الخلوي أو قد يحدث من مساهمات متعددة مثلا الاستقطاب حول سطح الخلية المشحون [8, 9,10,11]. اما فى تشتت بيتا β فانه يعزى بشكل رئيسى الى استقطاب غشاء الخلية الذي يعمل كحاجز لتدفق الشحنات بين الوسطين الداخلي والخارجي للخلية. ففى الترددات المنخفضة التيار يمرفقط خلال السائل خارج الخلية ولكن عند الترددات العالية فان التيار له القدرة على اختراق غشاء الخلية وبالتالي المرور خلال كل من الوسط داخل وخارج الخلية [12] .

تفيدنا دراسة الخصائص الكهربائية للأنسجة في مراقبة استجابة الأنسجة للإشعاع، حيت ان نسيج الخلية سيعاني من تغيرات ملحوظة خلال فترة التشعيع، وبعد فترة طويلة كرد فعل نتيجة لتطورات حيوية متأخرة، ومن أهمّ هذه الخصائص, المعاوقة الكهروحيوية bioimpedance، التى ترتبط بالسماحية والموصلية ؛ لأنها كمّية مركّبه لديها مركّبات من تخزين الشحنة والتوصيل، فهي تعطي رؤية أشمل لسلوك الأنسجة، تاريخيا درست المعاوقة الكهروحيويه في الأنسجة الحيوية في القرن التاسع عشر، أما التقدّم في هذه الدراسة كان نهاية القرن العشرين (1970م). منذ ذلك الحين وكنتائج جهود البحث هناك العديد من الدراسات للخصائص الكهربية للانسجة .هذه الخواص توصف باستخدام القيمة المطلقة للسماحية المركبة (ε^*) [7] والتى تتكون من حدين هما : السماحية النسبية (ε') وهي وصف لاستقطاب الوسط ، و الموصلية (σ) وهي وصف قدرة إنسياب الشحنات الحرة خلال المادة.

$$\epsilon^* = \epsilon' - \boldsymbol{i}\,\epsilon'' = \epsilon' - \boldsymbol{i}\frac{\sigma}{\omega\,\epsilon_0} \qquad (1)$$

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\, \epsilon_0} \qquad (2)$$

حيث ϵ' هي السماحية النسبية ، ϵ_0 سماحية الفراغ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m) والموصلية σ وتقاس بوحدة S/m ، اما ϵ'' هي ما يعرف بخسارة العزل أو عامل الخسارة (the dielectric loss or loss factor).

التجربة والقياسات

تمت القياسات لعدد 74 من حيوانات التجارب (الجرذان البيض) علي مراحلتين. مجموعة المرحلة الاولي وبها 26 جرذا منها عدد 6 مجموعة ضابطة (غير مشعة) والباقي تم تشعيعها بـ 400 راد (Rad) وتقسيمها الى خمس مجموعات فرعية (كل منها 4 جرذا). وتم اجراء القياسات بعد ذبح الجرذان المشعة واستئصال الكلى في فترات زمنية مختلفة ومحددة (2، 4، 9، 16، 30 يوم بعد التشعيع). اما مجموعة المرحلة الثانية فكانت مكونة من 48 جرذا منها عدد 4 جرذان مجموعة ضابطة و الباقى تم اجراء القياسات لها بعد 10 أيام من تعريض كل مجموعة فرعية (4 جرذان) لجرعة واحدة على التوالى (0.5 , 1, 1.5 ,2.5, 3 , 3.5 , 4 , 4.5 , 5 , 5.5 , 6 Gy). فى كلا المرحلتين السابقتين تم تعريض الجرذان كليا للإشعة السينية باستخدام المعجل الخطي (6 ميجا فولت) بقسم الاشعاع الطبي بكلية الطب، جامعة الإسكندرية – مصر. الخصائص الكهربية لكل العينات المستأصلة تم قياسها في مدي التردد بين 300 Hz و 5 MHz بعد الذبح مباشرة باستخدام طريقة تقنية القياسات ثنائية الاقطاب الكهربية وباستخدام القنطرة المترية في القياس نوع: (HIOKI 3532-50 LCR meter 42 Hz to 5 MHz HiTester, Japan).

خلية المكثف التي استخدمت للقياسات (شكل 2) تتضمن قضيبين كهربائيين دائريين متوازيين من الفضة مطليين بطلاء كلوريد الفضة (silver chloride) بقطر 1 cm (مساحة السطح = 0.785 cm^2) و يوفر silver-silver chloride وصلة نقل جيدة بأقل استقطاب. يحاط القطبان الكهربائيان بغرفة من الزجاج البلاستيكي، إحدى الأقطاب ثابت في قاع الغرفة اما القطب الاخر متحرك وقابل للتعديل ليلائم حجم عينة النسيج.

تم قياس المعاوقة الكهربية (Z) للانسجة وحساب الموصلية (σ) والسماحية النسبية (ϵ') وفقا للمعادلات التالية [13] :

$$Z^* = R + \boldsymbol{i}\, X \qquad (3)$$

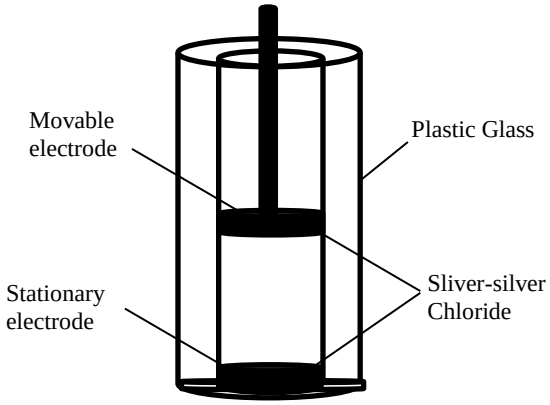
حيث R المقاومة (resistance) و X المعاوقة (reactance) و Z^* المعاوقة المركبة. ويمكن كتابتها كدالة في المعاوقة المركبة الموصلة (G) و السعة (C) على الصيغة التالية :

$$Y^* = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Z^*}} = G + \boldsymbol{i}\, \omega\, C \qquad (4)$$

حيث Y^* هي المسامحة المركبة complex admittance و $\omega = 2\pi f$ (دالة في التردد). وترتبط الخواص الكهربية للانسجة الحيوية بالمعاوقة المركبة الموصلة و السعة كدالة فى المقاومة والمعاوقة على النحو التالي:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \qquad (5)$$

$$C = \frac{X}{\omega\,(R^2+X^2)} \qquad (6)$$



شكل 2. رسم تخطيطي لخلية المكثف متضمنة قطبين كهربائيين دائريين من الفضة

وتكون الموصلية الكهربية (σ) والسماحية النسبية للوسط الحيوي (ϵ') اللذان يعتمدان على طبيعة العينة وعلاقتهما بمعامل ثابت خلية القياس ($\frac{d}{A}$) كـالتالي:

$$\sigma = \frac{d}{A}.G \qquad (7)$$

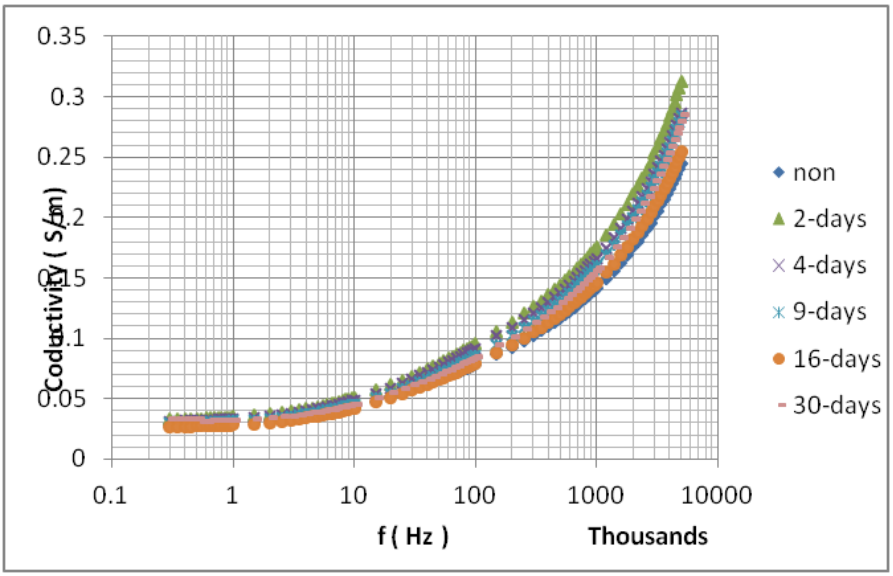
$$\epsilon' = \frac{d}{A}.\frac{C}{\epsilon_0} \qquad (8)$$

حيث d طول العينة بين قطبى خلية القياس و A مساحة سطح كلا قطبى الخلية اللذان حصران العينة بينهما.

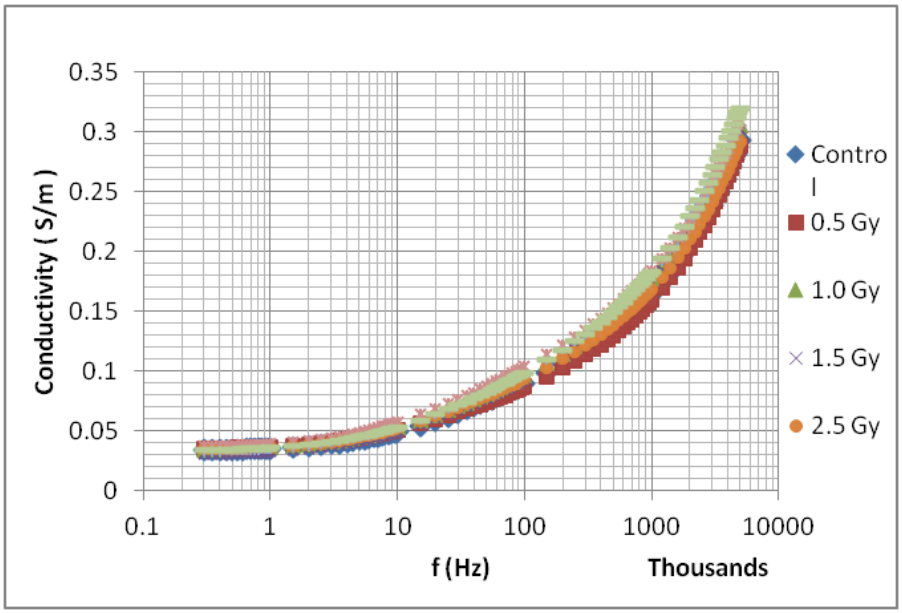
النتائج والمناقشة

الخصائص الكهربائية للأنسجة المشعة هي دالة في الجرعة والزمن بعد التشعيع [14,15]. وبالتالي قادنا هذا الى دراسة المزيد من الخصائص الكهروحيوية مثل الموصلية و السماحية. باستخدام المعلدلات (8 – 2) تم حساب ورسم منحنيات اطياف الموصلية الكهربية والسماحية النسبية كدالة فى التردد لفترات زمنية محددة بعد التشعيع وكذلك لجرعات مختلفة ومحددة. ان طيف منحنى الموصلية للفترات الزمنية بعد التشعيع كما بالشكل 2 عند التردد المخفض ($< 10^3$Hz) لايضهر تغيرات واضحة ولكن يلاحظ المنحنيات متحدة كوحدة لا فواصل بينها وبزيادة التردد يظهر لنا بعض التغيير فى الموصلية عند اليوم الثانى والرابع حيث تزداد الموصلية تم تقل تدريجيا حتى اليوم السادس عشر مقترباً من قيمة الموصلية للانسجة غير المشعة تم تزداد زيادة طفيفة عند اليوم الثلاثين بعد التشعيع. اما بالنسبة لطيف منحنى الموصلية

للجرعات المختلفة كما فى شكل 3 فانه ايضا عند التردد المخفض ($< 10^3$ Hz) لايضهر تغيرات واضحة ولكن بزيادة التردد تظهر لنا الزيادة التدريجية فى الموصلية ونلاحظ فواصل بين المنجنيات لكل جرعة محددة ويظهر ذلك جليا عند الانسجة المشععة بجرعات تزيد عن (3.5 Gy).

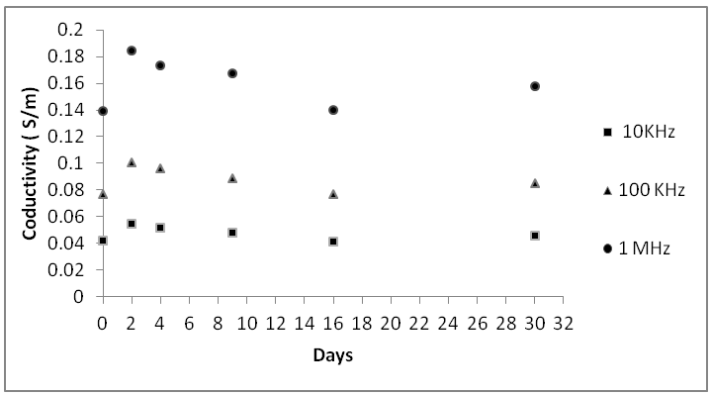


شكل 3. علاقة الموصلية بالتردد في أنسجة الكلى لفترات زمنية محددة بعد التشعيع.

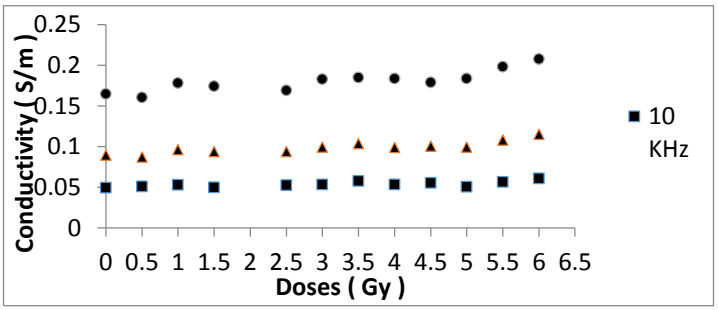


شكل 4. علاقة الموصلية بالتردد في أنسجة الكلى لجرعات اشعاعية مختلفة ومحددة.

ولايضاح هذه التغيرات وبتحليل عميق لكل العينات المقاسة لابد من اختيار ثلاث ترددات محددة (10 KHz, 100 KHz, 1MHz)، فكما بشكل 4 بالنسبة للموصلية عند التردد 10 KHz يظهر تغير طفيف فى قيمة الموصلية بين الانسجة المشعة وغير المشعة وخاصة عند اليوم الثانى بعد التشعيع فان قيمة الموصلية 0.055 S/m . اما عند التردد 1MHz يلاحظ زيادة واضحة فى قيمة الموصلية متذبذبة عند كل الايام بعد التشعيع فهى اكبر عند مقارنتها بقيمة الموصلية للانسجة غير المشعة (0.140 S/m) عند نفس التردد. و يمكن تفسير عدم الانتظام الواضح بسبب ان التشعيع على كامل جسم الحيوان لم يتركز على عضو محدد لذلك فإن الاعضاء تؤثر على بعضها فنسيج الكلى يتأثر بالضرر الذى يحدثه الاشعاع على باقي اعضاء الجسم، هذا التأثير على الكلى من عضو الى عضو أخر يحدث في فترات زمنية مختلفة بعد التشعيع فنلاحظ تداخل في المنحنيات الكلى عندما يعرض الجسم كله للاشعاع. امـــا فى شكل 5 فـان الموصلية للجرعات المختلفة عند الترددين 10 KHz, 100 KHzيظهر تغيرا طفيف بزياد الجرعات عن (3 Gy) ولكن عند التردد (1MHz) نلاحظ ان الموصلية تزداد تدريجيا كلما ازدادت الجرعات حيث تزداد قيمة الموصلية للانسجة المشعة عند (6 Gy) بمقدار (0.0429 S/m) عن قيمتها فى الانسجة غير المشعة .وكما تدل دراسات سابقة ان الزيادة فى الموصلية تفسر بانها الزيادة فى السائل الخلوى [16,17].

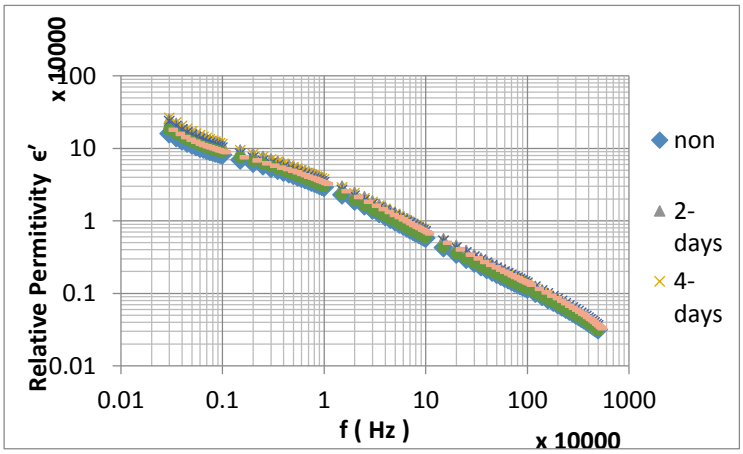


شكل 5. الموصلية الكهربية لفترات زمنية مختلفة بعد التشعيع عند ثلاث ترددات محددة.

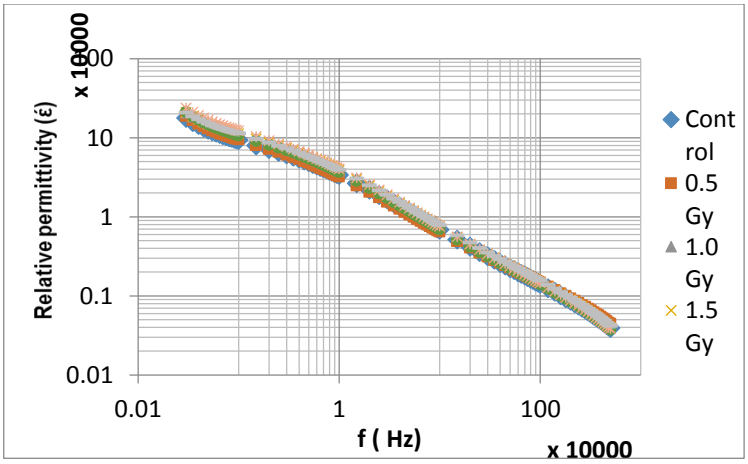


شكل 6. الموصلية الكهربية لجرعات اشعاعية مختلفة عند ثلاث ترددات محددة.

اما بالنسبة للسماحية النسبية كما فى الشكلين (6,7) فان اطياف منحنيات السماحية النسبية للانسجة المشعة وغير المشعة لا يلاحظ اى مسافات بينها ولكنها تظهر متحدة كوحدة واحدة عند الترددات المنخفظة والعالية. وبتحليل عميق للقياسات المحسوبة للانسجة عند الترددات الثلاث المختارة يظهر لنا بعض التغييرالطفيف جدا فى السماحية، ففى الشكل (8) فانه يلاحظ بعض التغييرالطفيف جدا عند اليوم الثانى والرابع ثم يختفى بقية الايام وفى الشكل (9) فانه يلاحظ بعض التغييرالطفيف جدا عند الجرعة (6 Gy) بمقدار ($\Delta\epsilon' = 144$) عن قيمة السماحية النسبية للانسجة غير المشعة وهو فرق غير ذو قيمة احصائية فى السماحية النسبية بين الانسجة المشعة وغير المشعة وهذا يعنى ان تاثير الاشعاع على أنسجة الكلى لا تظهر تغير منتظم واضح في فترات مختلفة بعد التشعيع الا بعد (150 يوم) بعد التشعيع [18] ولايمكن تحديده بدقة بالجرعات المطبقة عند (6 Gy) وان الضرر الخلوى وخاصة على الغشاء الخلوى لا يلاحظ الا اذا كانت جرعة الاشعاع تزيد عن (13 Gy) عند تشعيع الجسم ككل كما تدل بعض الابحاث [18,19,20].

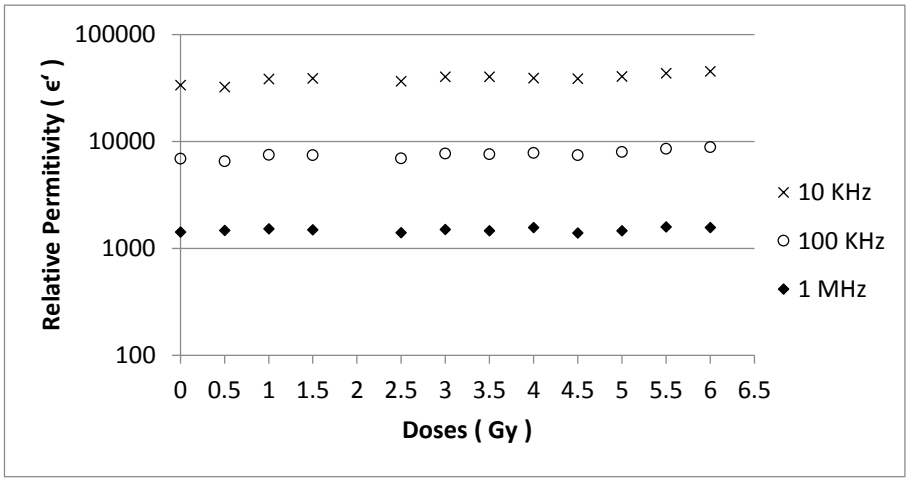


شكل 7. علاقة السماحية النسبية بالتردد في أنسجة الكلى لفترات زمنية محددة بعد التشعيع.

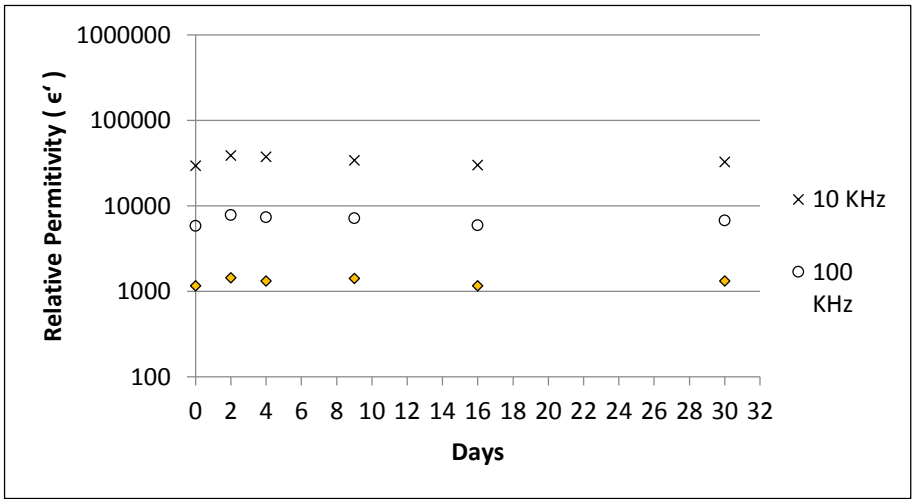


شكل 8. علاقة السماحية النسبية بالتردد في أنسجة الكلى لجرعات اشعاعية مختلفة ومحددة.

الموصلية والسماحية الكهربية لأنسجة الكلى المشعة



شكل 9. السماحية النسبية لفترات زمنية مختلفة بعد التشعيع عند ثلاث ترددات محددة.



شكل 10. السماحية النسبية لجرعات اشعاعية مختلفة عند ثلاث ترددات محددة.

الخلاصة

في هذا البحث تمت دراسة الخصائص الكهربائية للأنسجة لأنها تعتبر مؤشر للضرر الخلوي بسبب الإشعاع، فالنسيج المشعع يظهر اختلافا في العزل عن النسيج قبل التشعيع. أن نوعية الإشعاع ومستوى الجرعة والوقت بعد التشعيع هي عوامل تحدد مقدار الاستجابة للعلاج الإشعاعي. ولتحسين فهمنا لهذه الاستجابة، ركزنا على الخصائص الكهربائية لمراقبة التغيرات التي يسببها الإشعاع وهي تمكننا من معرفة ردة فعل أنسجة الكلية للإشعاع.

تمت دراسة منحنيات الموصلية والسماحية النسبية فى مدى من التردد 300 Hz – 5 MHz فوجد أن الموصلية تزداد بزيادة التردد والعكس مع االسماحية. عند دراسة الخصائص الكهربائية عند تثبيت الجرعة 4 Gy وتغيير الزمن بعد التشعيع،

وجد أن القيمة الأعلى للموصلية كانت عند اليوم الثانى للتشعيع؛ وذلك لأن الأنسجة تكون متضررة بشكل كبير بزيادة السوائل والتأثير المباشر للشعاع المؤين وموصليتها عالية ثم تقل قيمة للموصلية عند اليوم 16 بعد التشعيع.

لوحظ ايضا ازدياد فى قيمة الموصلية في العينات المشعة بجرعات إشعاع مختلفة أعلى من 4 Gy عند زمن ثابت بعد التشعيع (10 ايام)، ولكن لم يظهر تغير ذو قيمة احصائية مهمة فى السماحية النسبية بين الانسجة المشعة وغير المشعة عندما كانت السماحية النسبية كدالة فى التردد لفترات زمنية او لجرعات مختلفة ومحددة. وهذا السلوك غير متوقع وقد دلت دراسات سابقة ان الكلى اكثر الاعضاء مقاومة لتاثير الاشعاع [18] وان تاثير الاشعاع على الكلى لا يظهر ضررا واضحا على غشاء الخلية عندما يتعرض الجسم كليا للاشعاع الا عندما تزيد الجرعة عن 13 Gy . بينما فى هذا الشغل فان اعلى قيمة للجرعة هى 6 Gy ولهذا لم نلاحظ تاثير فى خصائص العزل الكهربى (السماحية) .

المراجع

[1] Osterman, K. S., Hoopes, P. J. and Paulsen, K. D.(2004). Non-invasive assessment of radiation injury with electrical impedance spectroscopy. Phys. Med. Biol., **49**, 665–683.

[2] Tamura, T., Tenhunen, M., Lahtinen, T., Repo, T. and Schwan, H. P. (1994). Modelling of the dielectric properties of normal and irradiated skin. Phys. Med. Biol., **39**, 927-936.

[3] Gabriel, C., Gabriel, S. and Corthout, E. (1996). The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. Phys. Med. Biol., **41**, 2231-2249.

[4] Gabriel, S., Lau, R. W. and Gabriel, C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol. **41**, 2271–2293.

[5] Kozlowskatt, J., Rigaudt, B. and Moruccit, J. P. (1992). Determination of impedance of tissue in the frequency range 10^{-6} - 20 MHz: preliminary results. Clin. Phya. Physiol. Meas., **13**(Suppl. A), 3-75.

[6] Smith, S. R. and Foster, K. R. (1985). Dielectric properties of low-water-content tissues. Phys. Med. Biol., **30**, 965-973.

[7] Foster, K. R. and Schwan, H. P. (1989). Dielectric properties of tissues and biological materials: a critical review. Crit. Rev. Biomed. Eng., **17**, 25–104.

[8] Paulsen, K. D., Osterman, K. S. and Hoopes, P. J. (1999). In vivo electrical impedance spectroscopic monitoring of the progression of radiation-induced tissue injury. Radiation Res. **152**, 41–50.

[9] Schwarz, G. (1962). Theory of the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution. J. Phys. Chem., **66**, 2636 –2642.

[10] Einolf, C. W. and Carstensen, E. L. (1971). Low- frequency dielectric dispersion in suspensions of ion-exchange resins. J. Phys. Chem., **75**, 1091–1099.

[11] Reilly, J. P. (1998). Applied Bioelectricity, From Electrical Stimulation to Electropathology. New York, Springer-Verlag.

[12] Brian, H. B., John, A. T., Karen, B., Anthony, D. B., Rod, H. S. and Frank, S. (2000). Relation between tissue structure and imposed electrical current flow in cervical neoplasia. Lancet, **95**, 355- 892.

[13] Ahad, M. A., Fogerson, P. M., Rosen, G. D., Narayanaswami, P. and Rutkove, S. B. (2009). Electrical characteristics of rat skeletal muscle in immaturity, adulthood and after sciatic nerve injury, and their relation to muscle fiber size. Physiol. Meas. **30**, 1415–1427

[14] عاليا محمد الشريف , خالد محمد المرغنى , احمد عمر الحماصى, واحمد محمد الحاج (2018). التردد المميز لانسجة الكلى المشعة باستخدام نموذج كول ودافيدسون . The Libyan Journal of Science, **21A**, 91-100.

[15] Moustafa, M., El-Khatib, A., Nabil, K. M., Samia, R., and Elhaj, A. M. (2012). Effects of X-Ray Irradiation on body water, and electric properties of rat tissues. Romanian J. Biophys., **22**(1), 51–64.

[16] Threlfall, G., Cairnie, A. B., Taylor, D. M. and Buck, A. T. (1966). Effect of whole body X-irradiation on renal compensatory hypertrophy. Radiation Res., **27**, 559-565

[17] Wachtel, L. W., Cole, L. J. and Rosen, V. J. (1966). Abscopal and direct effects of whole-body X-irradiation: Rat kidney mitotic activity and DNA content after uninephrectomy. Intern. J. Radiation Biol. Rad. Res., **10**, 75-82.

[18] Shima, M., Mette, F., *etc.* (2019). Optical metabolic imaging for assessment of radiation – induced injury to rat kidney and mitigation by lisinopril. Annals of biomedical Engineering, **47**, 1564-1574.

[19] Wachtel, L. W. and Cole, L. J. (1965). Abscopal effects of whole-body X-irradiation on compensatory hypertrophy of the rat kidney. Radiation Res., **25**, 78-91

[20] Lenarczyk, M., Kronenberg, A., Made, M., North, P.E., Komorowski, R., Cheng, Q., Little, M. P., Chiang,I-H., LaTessa, C.,Jardine, J and Baker, J. E. (2019). Age at exposure to radiation determines severity of renal and cardiac disease. Radiation Res., **192**, 63-74