

الموصلية والسماحية الكهربائية لأنسجة الكلى المشعّة Conductivity and Permittivity of Irradiated Rats' Kidney Tissue

عالية محمد الشريف¹، أحمد محمد الحاج²، خالد عبد الحفيظ المرغني³ و أحمد إمام الحماسي⁴

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة طرابلس

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

المستخلص

ازدادت أهمية دراسة الخصائص الكهربائية للأنسجة المشعّة في العلاج الإشعاعي 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 الكهربائية وتأثير الإشعاع على أنسجة الكلى للجرذان في مدي ترددات (300 Hz – 5 MHz)، بالنسبة للمجموعة الاولى من خلال تعريض الجسم كله لجرعة (4 Gy) واجريت القياسات في فترات زمنية محددة (2, 4, 16, 30 days) بعد التشعيع وكذلك بالنسبة للمجموعة الثانية من خلال تعرضها لجرعات مختلفة ومحددة (0.5 – 6 Gy). تم حساب الموصلية والسماحية لكل العينات ودراسة كدالة في الزمن او الجرعة الإشعاعية. أظهرت النتائج بان التغيرا في قيمة الموصلية بين الأنسجة المشعّة وغير المشعّة للفترات الزمنية بعد التشعيع قد ازدادت في اليوم الثاني والرابع، ثم نقصت واقتربت من قيمة الموصلية للأنسجة غير المشعّة في اليوم السادس عشر وأخيراً ازدادت قليلا في اليوم الثلاثين. وايضا ازدادت قيمة الموصلية تدريجيا بزيادة الجرعات لتكون عند الجرعة (6 Gy) قد ازدادت بمقدار (0.0429 S/m) عن قيمتها في الأنسجة غير المشعّة. اما بالنسبة للسماحية النسبية فان اطراف منحنيات السماحية النسبية تظهر تغييرا طفيفا جدا عند اليوم الثاني والرابع ثم يختفي بقية الايام وكذلك يلاحظ تغييرا طفيفا جدا في قيمة السماحية النسبية بزيادة الجرعات الإشعاعية وهو فرق غير ذو قيمة احصائية بين الأنسجة المشعّة وغير المشعّة. ان هذا يعني ان تأثير الإشعاع على أنسجة الكلى لا تظهر تغير منتظم و واضح في فترات مختلفة بعد التشعيع حتى (30 يوم) وثبت لدينا بان ضرر الغشاء الخلوي لا يظهر في الجرعات المنخفضة للإشعاع التي لا تتجاوز (6 Gy) عند تشعيع الجسم ككل.

الكلمات المفتاحية: الجرعة الإشعاعية; الموصلية; السماحية; أنسجة الكلى; والزمن.

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.

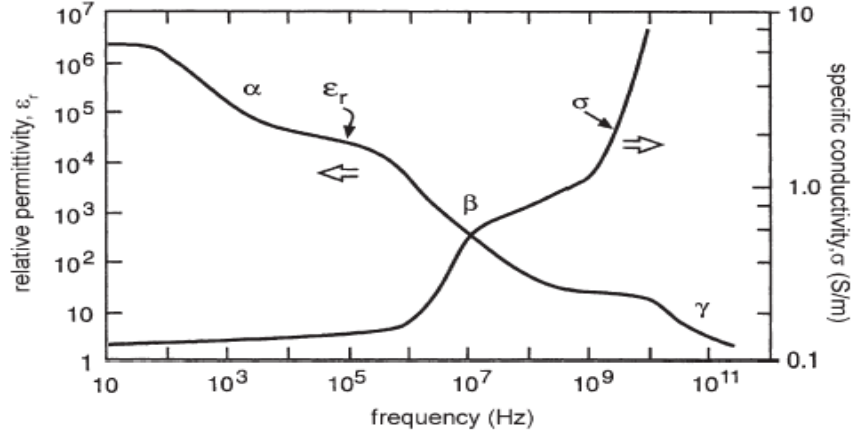
مقدمة

يؤثر الإشعاع على مكونات الأنسجة الحية ويتسبب في تلف الأنسجة اللحمية والاعوية الدموية وتعتمد شدة الأضرار على مقدار الجرعات والفترات الزمنية للتعرض للإشعاع [1,2]. وتكشف بعض الدراسات إمكانية استخدام التحليل الطيفي للمعاوقة الكهربائية في دراسة ومراقبة تطور إصابة الأنسجة التي سببها التعرض للإشعاع وتصبح دراسة الخصائص الكهربائية عوامل مهمة في تقييم نسبة الضرر و بالتالي العلاج كما في حالات الأورام. ان الأنسجة الحية لها مقاومة كهربية تعتمد على التردد ونوع الأنسجة , وبالتالي فان طيف المعاوقة الكهربائية هي دالة في التردد يمكن استخدامها للتمييز بين الأنسجة الطبيعية والمتضرر [3,4,5,6]. يتم تحديد الخصائص الكهربائية للأنسجة بدراسة السلوك الكهربائي للمكونات والسوائل داخل وخارج الخلية التي 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 كهربائياً على عزل الخلية، وبالتالي يتم إنشاء بنية (الموصل- العازل - الموصل). ان الأيونات الأكثر شيوعاً في السائل خارج الخلية هي أيون الصوديوم والكلور، أما 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 فتتغير 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 -

الموصلية والسماحية الكهربائية لأنسجة الكلى المشعة

و 10^7 وتقل بزيادة التردد في ثلاث مناطق تشتت رئيسية (α ، β ، γ) كما بالشكل 1 وتعرف هذه المناطق بنواقد التشتت وهي تستند أساسا على الخصائص الكهربائية للمواد الحيوية وهي ذاتها تعتمد على التردد.



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

ففي منطقة تشتت α تعزى الى عملية الانتشار الأيوني عند الغشاء الخلوي أو قد يحدث من مساهمات متعددة مثلا الاستقطاب حول سطح الخلية المشحون [8, 9,10,11]. اما في تشتت بيتا β فانه يعزى بشكل رئيسي الى استقطاب غشاء الخلية الذي يعمل كحاجز لتدفق الشحنات بين الوسطين الداخلي والخارجي للخلية. ففي الترددات المنخفضة التيار يمر فقط 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، حيث ان نسيج الخلية سيعاني من تغيرات ملحوظة خلال فترة التشعيع، وبعد فترة طويلة كرد فعل نتيجة لتطورات حيوية متأخرة، ومن أهم هذه الخصائص، المعاوقة الكهروحيوية bioimpedance، التي ترتبط بالسماحية والموصلية ؛ لأنها كمّية مركبة لديها مركبات من تخزين الشحنة والتوصيل، فهي تعطي رؤية أشمل لسلوك الأنسجة، تاريخيا درست المعاوقة الكهروحيوية في الأنسجة الحيوية في القرن التاسع عشر، أما التقدّم في هذه الدراسة كان نهاية القرن العشرين (1970م). منذ ذلك الحين وكننتائج جهود البحث هناك العديد من الدراسات للخصائص الكهربائية للأنسجة. هذه الخواص توصف باستخدام القيمة المطلقة للسماحية المركبة (ϵ^*) [7] والتي تتكون من حدين هما : السماحية النسبية (ϵ') وهي وصف لاستقطاب الوسط ، و الموصلية (σ) وهي وصف قدرة إنسياب الشحنات الحرة خلال المادة.

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

عالية محمد الشريف، أحمد محمد الحاج، خالد عبد الحفيظ المرغني و أحمد إمام الحماسي

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

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 مرحلتين. مجموعة المرحلة الاولى وبها 26 جرذا منها عدد 6 مجموعة ضابطة (غير مشععة) والباقي تم تشيعيها بـ 400 راد (Rad) وتقسيماها الي خمس مجموعات فرعية (كل منها 4 جرذا). وتم اجراء القياسات بعد ذبح الجرذان المشععة واستئصال الكلى في فترات زمنية مختلفة ومحددة (2، 4، 9، 16، 30 يوم بعد التشيع). اما مجموعة المرحلة الثانية فكانت مكونة من 48 جرذا منها عدد 4 جرذان مجموعة ضابطة و الباقي تم اجراء القياسات لها بعد 10 أيام من تعريض كل مجموعة فرعية (4 جرذان) لجرعة واحدة على التوالي (0.5 , 1 , 1.5 , 2.5 , 3 , 3.5 , 4 , 4.5 , 5 , 5.5 , 6 Gy) . في 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 المستأنسة 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 مطلين 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] :

$$(3) \quad Z^* = R + i X$$

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 :

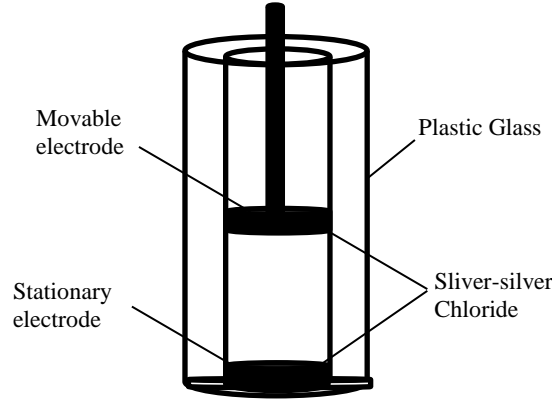
$$(4) \quad Y^* = \frac{1}{Z^*} = G + i \omega C$$

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 في المقاومة والمعاوقة على النحو التالي:

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

الموصلية والسماحية الكهربائية لأنسجة الكلى المشععة

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



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

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

$$(7) \quad \sigma = \frac{d}{A} \cdot G$$

$$(8) \quad \epsilon' = \frac{d}{A} \cdot \frac{C}{\epsilon_0}$$

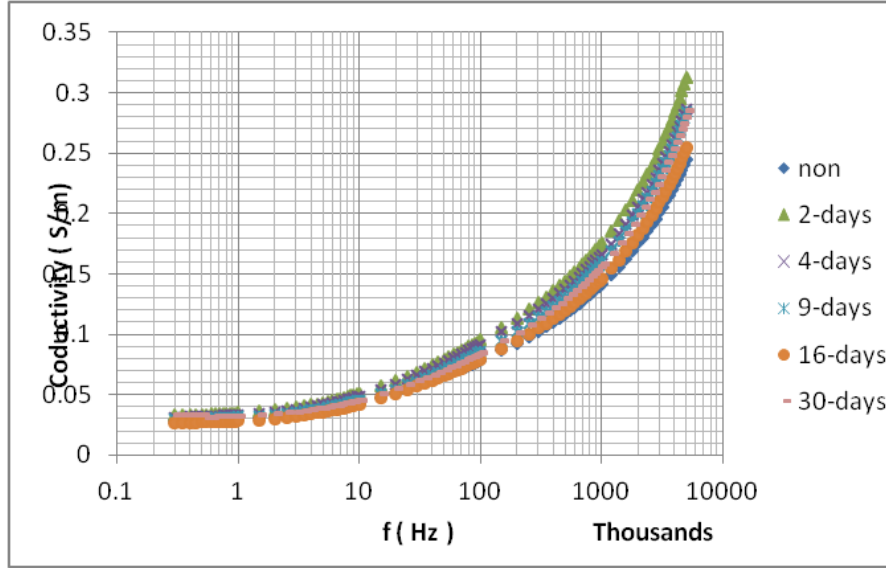
حيث d طول العينة بين قطبي خلية القياس و A مساحة سطح كلا قطبي الخلية اللذان حصران العينة بينهما.

النتائج والمناقشة

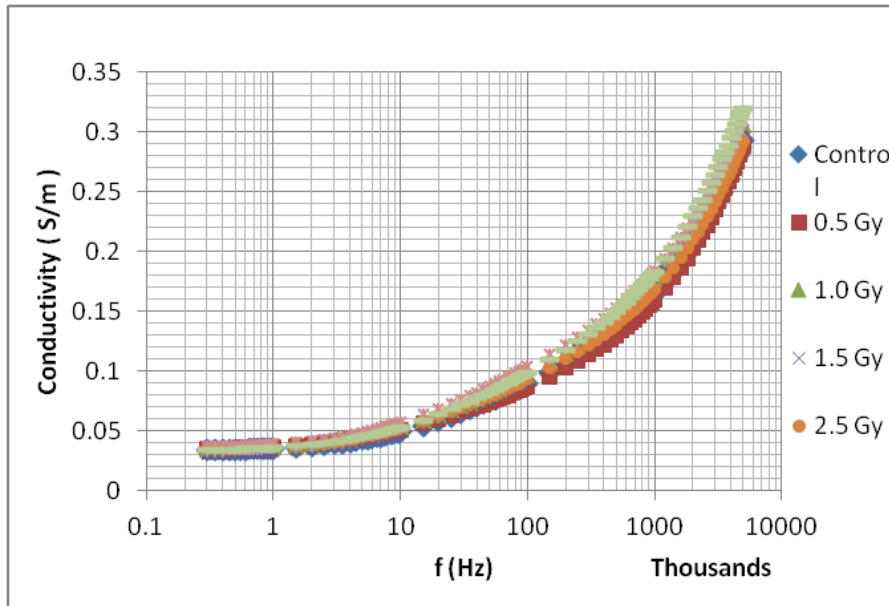
الخصائص الكهربائية لأنسجة المشععة هي دالة في الجرعة والزمن بعد التشعيع [14,15]. وبالتالي قادنا هذا الى دراسة المزيد من الخصائص الكهروحيوية مثل الموصلية و السماحية. باستخدام المعدلات (8 - 2) تم حساب ورسم منحنيات اطيف الموصلية الكهربائية والسماحية النسبية كدالة في التردد لفترات زمنية محددة بعد التشعيع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

عالية محمد الشريف، أحمد محمد الحاج، خالد عبد الحفيظ المرغني و أحمد إمام الحماسي

للجرعات المختلفة كما في شكل 3 فانه ايضا عند التردد المخفض (10^3 Hz) لا يضر تغيرات واضحة ولكن بزيادة التردد تظهر لنا الزيادة التدريجية في الموصلية ونلاحظ فواصل بين المنحنيات لكل جرعة محددة ويظهر ذلك جليا عند الانسجة المشعة بجرعات تزيد عن (3.5 Gy).



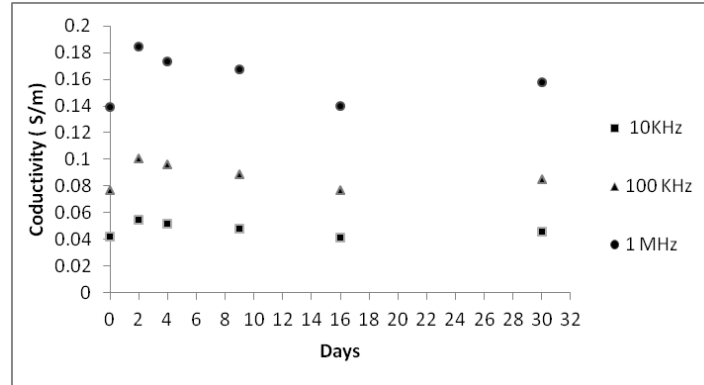
شكل 3. علاقة الموصلية بالتردد في أنسجة الكلى لفترات زمنية محددة بعد التشعيع.



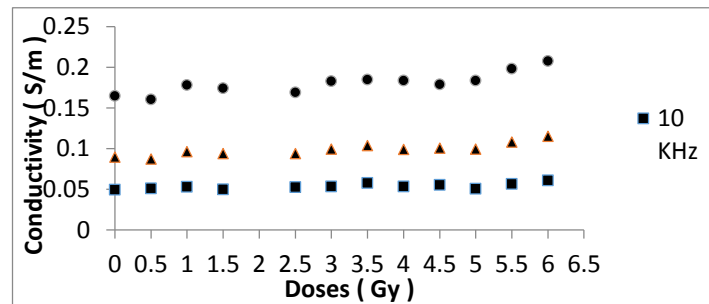
شكل 4. علاقة الموصلية بالتردد في أنسجة الكلى لجرعات اشعاعية مختلفة ومحددة.

الموصلية والسماحية الكهربائية لأنسجة الكلى المشعّة

ولايضاح هذه التغيرات وتحليل عميق لكل العينات المقاسة لآبد من اختيار ثلاث ترددات محددة (10 KHz, 100 KHz, 1 MHz)، فكما بشكل 4 بالنسبة للموصلية عند التردد 10 KHz يظهر تغير طفيف في قيمة الموصلية بين الأنسجة المشعّة وغير المشعّة وخاصة عند اليوم الثاني بعد التشعيع فان قيمة الموصلية 0.055 S/m. اما عند التردد 1 MHz يلاحظ زيادة واضحة في قيمة الموصلية متذبذبة عند كل الايام بعد التشعيع فهي اكبر عند مقارنتها بقيمة الموصلية للأنسجة غير المشعّة (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 تتأثر على بعضها فنسيج الكلى يتأثر بالضرر الذي يحدثه الاشعاع على باقي اعضاء الجسم، هذا التأثير على الكلى من عضو الى عضو آخر يحدث في فترات زمنية مختلفة بعد التشعيع فنلاحظ تداخل في المنحنيات الكلى عندما يعرض الجسم كله للاشعاع. اما في شكل 5 فان الموصلية للجرعات المختلفة عند الترددين 10 KHz, 100 KHz يظهر تغيرا طفيف بزياد الجرعات عن (3 Gy) ولكن عند التردد (1 MHz) نلاحظ ان الموصلية تزداد تدريجيا كلما ازادت الجرعات حيث تزداد قيمة الموصلية للأنسجة المشعّة عند (6 Gy) بمقدار (0.0429 S/m) عن قيمتها في الأنسجة غير المشعّة. وكما تدل دراسات سابقة ان الزيادة في الموصلية تفسر بانها الزيادة في السائل الخلوى [16,17].



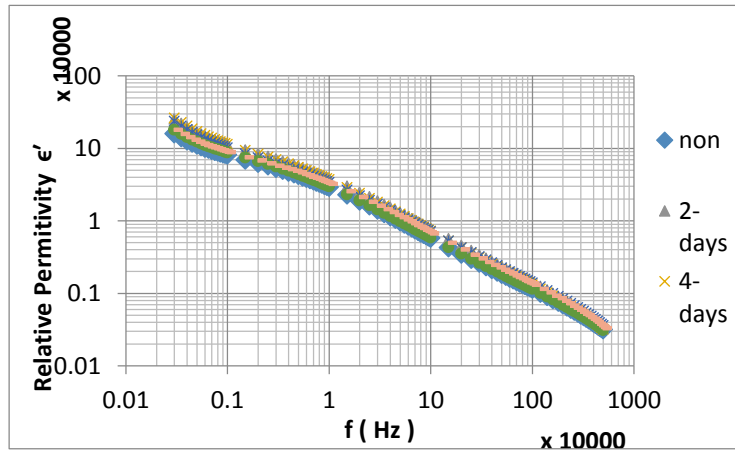
شكل 5. الموصلية الكهربائية لفترات زمنية مختلفة بعد التشعيع عند ثلاث ترددات محددة.



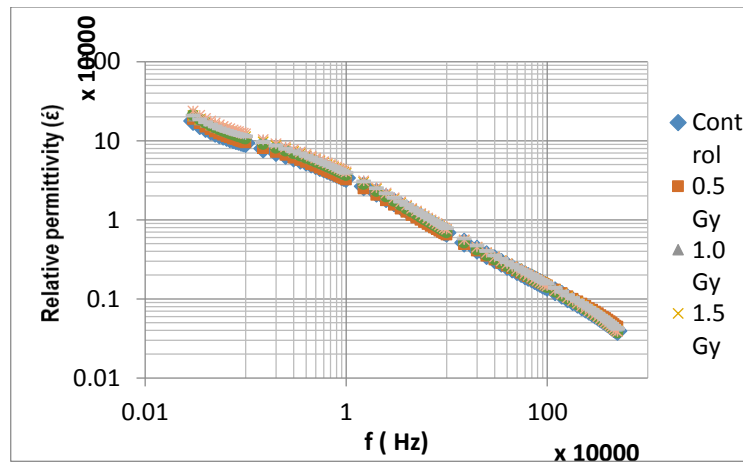
شكل 6. الموصلية الكهربائية لجرعات اشعاعية مختلفة عند ثلاث ترددات محددة.

عالية محمد الشريف، أحمد محمد الحاج، خالد عبد الحفيظ المرغني و أحمد إمام الحماسي

اما بالنسبة للسماحية النسبية كما في الشكلين (6,7) فان اطياف منحنيات السماحية النسبية للانسجة المشععة وغير المشععة لا يلاحظ اي مسافات بينها ولكنها تظهر متحدة كوحدة واحدة عند الترددات المنخفضة والعالية. وتحليل عميق للقياسات المحسوبة للانسجة عند الترددات الثلاث المختارة يظهر لنا بعض التغيير الطفيف جدا في السماحية، ففي الشكل (8) فانه يلاحظ بعض التغيير الطفيف جدا عند اليوم الثاني والرابع ثم يختفي بقية الايام وفي الشكل (9) فانه يلاحظ بعض التغيير الطفيف جدا عند الجرعة (6 Gy) بمقدار ($\Delta\epsilon' = 144$) عن قيمة السماحية النسبية للانسجة غير المشععة وهو فرق غير ذو قيمة احصائية في السماحية النسبية بين الانسجة المشععة وغير المشععة وهذا يعني ان تأثير الاشعاع على أنسجة الكلى لا تظهر تغير منظم واضح في فترات مختلفة بعد التشعيع الا بعد (150 يوم) بعد التشعيع [18] ولا يمكن تحديده بدقة بالجرعات المطبقة عند (6 Gy) وان الضرر الخلوي وخاصة على الغشاء الخلوي لا يلاحظ الا اذا كانت جرعة الاشعاع تزيد عن (13 Gy) عند تشعيع الجسم ككل كما تدل بعض الابحاث [18,19,20].

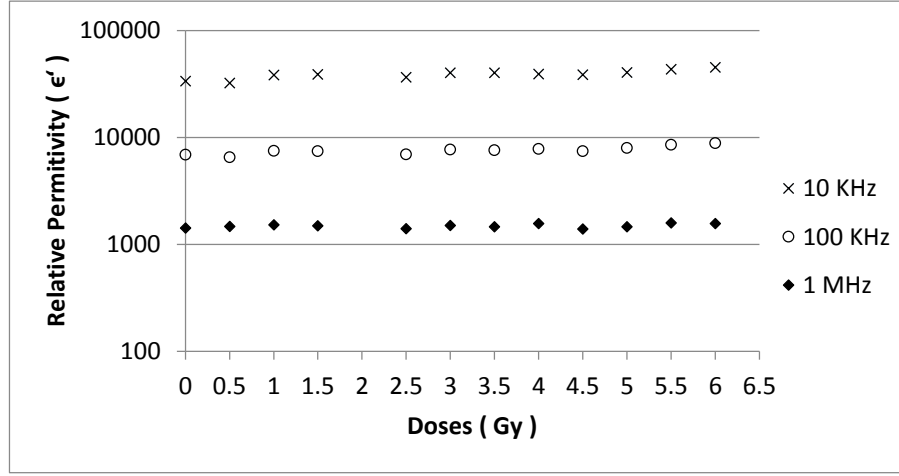


شكل 7. علاقة السماحية النسبية بالتردد في أنسجة الكلى لفترات زمنية محددة بعد التشعيع.

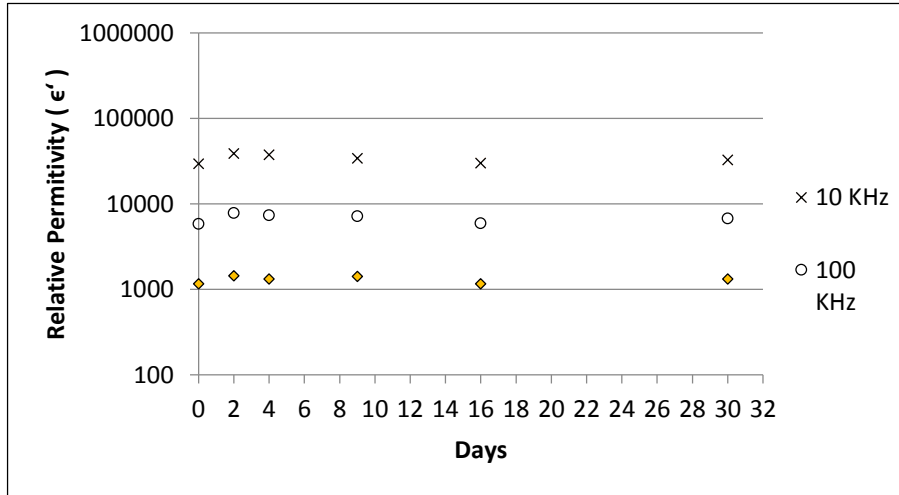


شكل 8. علاقة السماحية النسبية بالتردد في أنسجة الكلى لجرعات اشعاعية مختلفة ومحددة.

الموصلية والسماحية الكهربائية 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 لأنسجة الكلى المشعة لأنها تعتبر مؤشر للضرر الخلوي بسبب الإشعاع، فالنسيج المشع يظهر اختلافاً 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 تمكنا من معرفة ردة فعل أنسجة الكلية للإشعاع. تمت دراسة منحنيات الموصلية والسماحية النسبية في مدى من التردد 300 Hz – 5 MHz فوجد أن الموصلية تزداد بزيادة التردد والعكس مع السماحية. عند دراسة الخصائص الكهربائية عند تثبيت الجرعة 4 Gy وتغيير الزمن بعد التشعيع،

عالية محمد الشريف، أحمد محمد الحاج، خالد عبد الحفيظ المرغني و أحمد إمام الحماسي

وجد أن القيمة الأعلى للموصلية كانت عند اليوم الثاني 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 أيضا ازدياد في قيمة الموصلية في العينات المشععة بجرعات إشعاع مختلفة أعلى من 4 Gy عند زمن ثابت بعد التشعيع (10 أيام)، ولكن لم يظهر تغير ذو قيمة احصائية مهمة في السماحية النسبية بين الانسجة المشععة وغير المشععة عندما كانت السماحية النسبية كدالة في التردد لفترات زمنية او لجرعات مختلفة ومحددة. وهذا السلوك غير متوقع وقد دلت دراسات سابقة ان الكلى اكثر الاعضاء مقاومة لتأثير الاشعاع [18] وان تأثير الاشعاع على الكلى لا يظهر ضررا واضحا على غشاء الخلية عندما يتعرض الجسم كليا للاشعاع الا عندما تزيد الجرعة عن 13 Gy . بينما في هذا الشغل فان اعلى قيمة للجرعة هي 6 Gy ولهذا لم نلاحظ تأثير في 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] التردد المميز (2018). عاليا محمد الشريف , خالد محمد المرغنى , احمد عمر الحماصى, واحمد محمد الحاج . لانسجة الكلى المشعّة 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