الأشعة من حولنا

أ.د. محمد فاروق أحمد

الرياض
١٤٢٢هـ - ٢٠٠٢م

ⓒ مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية ، ١٤٢٢هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

احمد ، محمد فاروق

الأشعة من حولنا – الرياض.

٩٢ص ؛ ٢٥ سم.

ردمك :٣-٩١-٧٢٤-٩٩٦٠

١- الكهرومغناطيسية أ- العنوان

ديوي ٦٢١,٣ ٢٢/٤٨٨٤

رقم الإيداع: ٢٢/٤٨٨٤

ردمك : ٣-٩١-٧٢٤-٩٩٦٠

المحتويات

تقديم ٩

١- **الفصل الأول:** الأشعة الكهرمغنطيسية ١١

١-١ نبذة تاريخية ١١

١-٢ الأشعة (الموجات) الكهرمغنطيسية ١٢

١-٣ بعض الخصائص العامة للموجات الكهرمغنطيسية ١٢

١-٤ الفوتون والموجة الكهرمغنطيسية ١٥

١-٥ كيفية توليد بعض أنواع الموجات الكهرمغنطيسية ١٦

٢- **الفصل الثاني**: شرائح الأشعة الكهرمغنطيسية ١٩

٢-١ نبذة عامة ١٩

٢-٢ شريحة الموجات فائقة الطول ١٩

٢-٣ شريحة موجات الترددات الراديوية ٢١

٢-٤ شريحة الموجات الدقيقة ٢٢

٢-٥ شريحة الأشعة تحت الحمراء ٢٨

٢-٦ شريحة الضوء المرئي ٢٩

٢-٧ شريحة الأشعة فوق البنفسجية ٢٩

٢-٨ شريحة الأشعة السينية ٣٠
٢-٩ شريحة أشعة جاما ٣١

٣- الفصل الثالث: التأثيرات الضارة لبعض
أنواع الأشعة الكهرمغنطيسية ٣٣
٣-١ مقدمة ٣٣
٣-٢ التأثيرات الضارة للأشعة فوق البنفسجية والضوء ٣٣
٣-٣ التأثيرات البيولوجية للموجات الدقيقة ٣٦

٤- الفصل الرابع: أشعة الليزر ٤٣
٤-١ نبذة مختصرة عن أشعة الليزر ٤٣
٤-٢ جهاز توليد أشعة الليزر ٤٤
٤-٣ فعل الليزرة ٤٧
٤-٤ الليزر المستمر والليزر النبضي ٤٩
٤-٥ التأثيرات البيولوجية لأشعة الليزر ٥٠
٤-٦ معايير الوقاية من مخاطر أشعة الليزر ٥٥
٤-٧ متطلبات الوقاية من مخاطر الليزر في الولايات
المتحدة الأمريكية ٥٨

٤– الفصل الخامس: الأشعة المؤينة ٥٣

٥–١ تعريف الأشعة المؤينة ٦٣

٥–٢ مجموعة الأشعة الكهرمغنطيسية ٦٤

٥–٣ مجموعة الأجسام المادية ٦٦

٥–٤ تأثيرات الأشعة المؤينة ووحدات قياس جرعاتها ٧٠

٥–٥ المصادر الطبيعية للأشعة المؤينة ٧٥

٥–٦ بعض المصادر الصنعية للأشعة المؤينة ٨٦

تقديم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على رسوله الأمين، وعلى آله وصحبه ومن اهتدى بهديه إلى يوم الدين، وبعد

الأشعة جزء لا يتجزأ من هذا الكون الذي أبدعه الخالق عز وجل. وتعتبر الأشعة أحد أهم الأركان الرئيسة للحياة على ظهر البسيطة، بل وعلى أي كوكب آخر عامر بالحياة، أينما يوجد مثل هذا الكوكب. فالأشعة التي تصل أرضنا من الشمس هي وسيلة انتقال الحرارة من هذا النجم إلينا، وبالتالي فهي المصدر الذي لاينضب للطاقة والحرارة على هذه الأرض. والضوء الذي هو شكل من أشكال الأشعة يعتبر أحد الأركان الرئيسة لعملية التمثيل النباتي التي تمثل أهم مقومات الحياة ومصدر الغذاء للإنسان والحيوان والنبات.

ومع التطور العلمي والتقني هدانا المولى، عز وجل، قبل حوالي قرن من الزمان، للكشف عن أنواع أخرى من الأشعة التي تعم هذا الكون، وتوجد فيه منذ خلقه، منها تلك التي ترد إلينا من الفضاء الخارجي الشاسع، وهي الأشعة المعروفة حاليا باسم الأشعة الكونية، وتلك التي تنطلق إلينا من سطح الأرض، بل ومن ذات أجسامنا. وقد وصفت هذه الأشعة، سواء الكونية أو الأرضية، بالأشعة المؤينة، حيث يتركز مفعولها في تأيين ذرات المادة التي تسقط هذه الأشعة عليها.

كذلك تمكن الإنسان من الكشف عن أشكال أخرى من الأشعة ومن إنتاج هذه الأشكال، مثل الموجات الكهرمغنطيسية المستخدمة في شتى أنواع الاتصالات، وأشعة الليزر التي طوعت للاستخدام لأغراض متنوعة وفي مجالات عديدة. بل تمكن الإنسان من إنتاج العديد من أشكال الأشعة المؤينة والمواد المشعة التي تبثها، لاستخدامها في العديد من التطبيقات المفيدة بل والمدمرة أحيانا.

وعلى الرغم من أن كثيرا من أشكال الأشعة يعتبر ضروريا لحياة الإنسان، وأن بعض هذه الأشكال بات شديد النفع له وأصبح من مستلزماته، إلا أن جميع هذه الأشكال يمكن أن تشكل مخاطر متفاوتة على حياته، خاصة عندما يتعرض الإنسان

لهذه الأشعة بمعدلات تفوق حدودا معينة. فقد استشعر الإنسان بعض مخاطر التعرض لجرعات زائدة من الأشكال المختلفة للأشعة، وبات يبحث عن طبيعة ومدى بعض المخاطر الأخرى المترتبة عن هذا التعرض. ويهدف الإنسان من وراء هذا المسعى إلى الاستفادة القصوى من مزايا ومنافع الأشعة بجميع أشكالها مع إبقاء المخاطر والأضرار المتربتة عنها عند حدود معقولة، بحيث تتغلب منافعها على الأضرار.

ويهدف هذا الكتيب إلى إتاحة الفرصة للقارئ العربي للتعرف على أنواع الأشعة التي تكمن في كل مكان حوله، وفهم بعض جوانب أحد فروع العلم والتقنية الذي توسعت تطبيقاته في جميع نواحي الحياة، وبات من مستلزمات الحياة البشرية. وقد حاولت تبسيط المعلومات الواردة في معظم فقرات هذا الكتيب، إلا أنه يصعب تحاشي استخدام بعض المصطلحات الفنية في بعض فقرات الكتيب. وأرجو أن يجد القارئ في المادة المتاحة بعض مايطفئ ظمأه للمعرفة.

والله من وراء القصد.

المؤلف

١-٢ الأشعة (الموجات) الكهرمغنطيسية

الأشعة (الموجات) الكهرمغنطيسية هي صورة من صور الطاقة التي لا تستند على كتلة مادية، أي أنها كيان غير مادي وعديم الكتلة، وإنما هي طاقة متمثلة في صورة مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغنطيسي يتغيران بمرور الزمن وبتغير الموضع. ويمكن أن تتولد الموجات الكهرمغنطيسية من مصادر متنوعة ومختلفة. فمنها ما يتولد عن الشحنات الكهربائية المتسارعة أو المتباطئة أو عن التيارات الكهربائية المترددة، ومنها ما يتولد من الأجسام الساخنة غير المتوهجة أو من الأجسام الملتهبة المتوهجة. كذلك، يمكن أن تتولد الموجات الكهرمغنطيسية عند انتقال الإلكترونات بين المدارات المختلفة في الذرة أو نتيجة لاضمحلال طاقة الإثارة في نواة الذرة. وسوف تفصل مصادر توليد الموجات الكهرمغنطيسية المختلفة في الفقرات اللاحقة.

وتختلف بعض خصائص الموجات (الأشعة) الكهرمغنطيسية اختلافاً هائلاً بتغير مصدر تولدها رغم اشتراكها في عدد من الخصائص العامة مهما تغير المصدر، وسوف يرد فيما يلي سرد لبعض الخصائص العامة للموجات الكهرمغنطيسية.

١-٣ بعض الخصائص العامة للموجات الكهرمغنطيسية

الموجة الكهرمغنطيسية (المسماة أحيانا بالفوتون، وسوف يرد شرح ذلك لاحقا) هي عبارة عن مجالين متغيرين (متناوبين) أحدهما كهربائي E والآخر مغنطيسي B، تتغير شدتهما بتغير الزمن والموضع، وينتشران معاً في مستويين متعامدين فيما بينهما، بحيث يكون المجال الكهربائي في أحد هذين المستويين، ويكون المجال المغنطيسي بالتالي في المستوى الآخر العمودي على الأول. وتنتشر الموجة من نقطة التوليد في اتجاه المستقيم الذي يمثل مستقيم تلاقي هذين المستويين المتعامدين (شكل ١-١).

ويتغير كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي بين قيمة موجبة قصوى يطلق عليها اسم "القمة" وأخرى سالبة قصوى يطلق عليها اسم "القاع"، مرورا بالصفر. ويحدث هذا التغير وفقا لعلاقة رياضية بسيطة تعرف بالدالة التوافقية البسيطة المبينة على شكل (١-١). وتوصف الموجات الكهرمغنطيسية بأنها موجات مستعرضة

الفصل الأول

الأشعة الكهرمغنطيسية

١ـ١ نبذة تاريخية

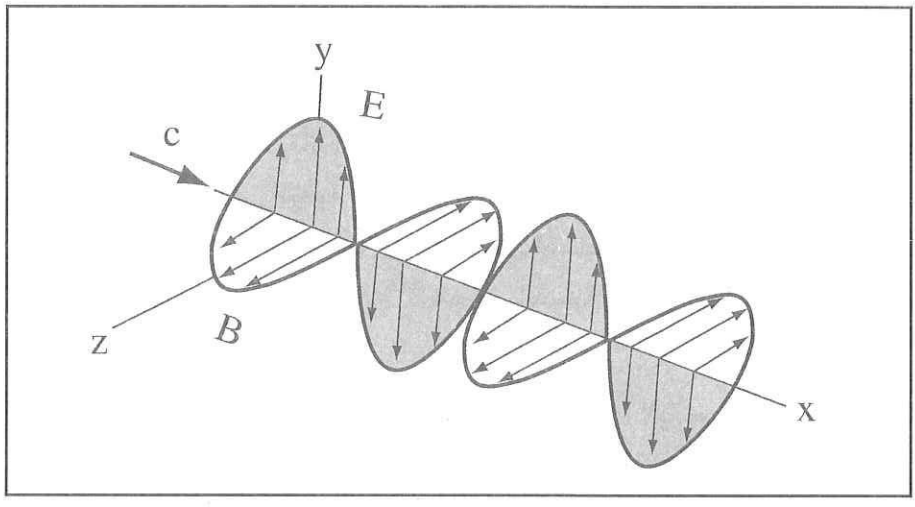
شهد القرن التاسع عشر الميلادي طفرة هائلة في علوم الفيزياء تمخضت عن العديد من الاكتشافات في مجال الحث الكهرمغنطيسي والموجات الكهرمغنطيسية. فقد تمكن ميشل فاراداي (١٧٩١–١٨٦٧م) من اكتشاف قوانين الحث المغنطيسي التي مفادها أن أي مجال مغنطيسي متغير مع الزمن يولد مجالاً كهربائياً متغيراً. كذلك، أوضحت دراسات كل من أمبير وماكسويل أن أي مجال كهربائي متغير مع الزمن يولد مجالاً مغنطيسياً متغيراً مع الزمن بنفس الأسلوب. واستناداً لهذه الحقائق العلمية تمكن الفيزيائي جيمس ماكسويل (١٨٣١–١٨٧٩م) من اشتقاق معادلاته الشهيرة الخاصة بالموجات الكهرمغنطيسية وصياغة نظرياته الخاصة بها، التي تحدد العلاقات المتبادلة بين المجالات الكهربائية والمغنطيسية المتغيرة.

لقد توصل ماكسويل من خلال هذه النظريات إلى التنبؤ بوجود الموجات الكهرمغنطيسية التي تنتشر في الفراغ بسرعة تساوي سرعة انتشار الضوء المرئي في الفراغ ($٢,٩٩٧٩٢ \times ١٠^{٨}$ م/ث)، الأمر الذي حدا به إلى تطوير فكرة أن الضوء المرئي هو صورة من صور الموجات الكهرمغنطيسية، وبالتالي، إلى إدراج الضوء ضمن هذه الموجات.

ولقد تحققت تنبؤات ماكسويل العلمية على يد هنريك هيرتز (١٨٥٧–١٨٩٤م) الذي تمكن لأول مرة من توليد الموجات الكهرمغنطيسية ومن الكشف عن هذه الموجات بصورة عملية. وقد أدى هذا الكشف العظيم في الربع الأخير من القرن التاسع عشر إلى ارتياد عصر جديد هو عصر الاتصالات اللاسلكية الذي بدأ في استخدام النظم اللاسلكية كالراديو والرادار والتلفاز في الاتصالات.

بطبيعتها. ويتجلى ذلك بوضوح على شكل (١-١) حيث يكون اتجاه انتشار الموجة من نقطة تولدها، دائما، عموديا على أقصر المستقيمات الواصلة بين قمم الموجة أو قيعانها وخط الانتشار. وبمعنى آخر فإنه بفرض أن المركبة الكهربائية للموجة الكهرمغنطيسية تتغير من القمة للقاع في المستوى (y,-y)، كما في شكل (١-١)، وأن مستوى تغير المجال المغنطيسي هو المستوى (z,-z) العمودي على المستوى الأول، يكون اتجاه انتشار الموجة هو اتجاه المحور السيني.

وتصل الموجتان الكهربائية والمغنطيسية إلى القمة معاً كما تؤولان معاً للصفر (راجع شكل ١-١) كل في مستوى انتشارها. ويطلق على هذه الموجة اسم الموجة المستوية، نظراً لانتشار كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي في مستويين منفصلين ومتعامدين.



شكل ١-١

وقد توصف الموجات الكهرمغنطيسية بأنها موجات مستقطبة. وقد يكون الاستقطاب أفقيا أو رأسيا (بالنسبة لسطح الأرض) أو في أي اتجاه آخر. ويستخدم الاستقطاب الأفقي أو الرأسي في الإرسال التلفزيوني وغيره. ويقصد بالموجات المستقطبة أفقيا أن تنتشر المركبة الكهربائية لجميع الموجات الكهرمغنطيسية في المستوى الأفقي (أي الموازي لسطح الأرض)، في حين تنتشر المركبة المغنطيسية لهذه

الموجات في المستوى الرأسي (أي العمودي على سطح الأرض). أما بالنسبة للموجات المستقطبة رأسيا فتنتشر المركبة الكهربائية في المستوى الرأسي في حين تنتشر المركبة المغنطيسية في المستوى الأفقي.

وتتميز كل موجة بكمية فيزيائية يطلق عليها "طول الموجة" يرمز لها في المراجع عادة بالرمز لامدا (وهي عبارة عن المسافة بين أي قمتين متتاليتين، أو قاعين متتاليين للمجال الكهربائي أو المغنطيسي). وتختلف أطوال الموجات الكهرمغنطيسية اختلافاً هائلاً تبعاً لشريحة هذه الموجات، وتتراوح هذه الأطوال بين أكثر من ألف كيلومتر للموجات الكهرمغنطيسية الطويلة أي منخفضة الطاقة، وحوالي الفمتومتر (الفمتومتر يعادل ١× ١٠$^{-١٥}$ من المتر). كما تتميز أي موجة كهرمغنطيسية بكمية أخرى يطلق عليها "تردد الموجة" f، وهو عدد يمثل عدد الموجات الكاملة (الاهتزازات الكاملة) في ثانية واحدة. ويقاس التردد بوحدة أطلق عليها هيرتز، تخليداً لذكرى العالم الذي توصل إلى توليد هذه الموجات والكشف عنها عملياً لأول مرة. وعندما يقال تجاوزا أن تردد الموجة يساوي الهيرتز الواحد فإن هذا يعني تكرر الشكل الكامل للموجة مرة واحدة في الثانية، وعندما يقال أن التردد ٥٠ ميغا هيرتز فهذا يعني أن الموجة الكاملة تتكرر ٥٠ مليون مرة في الثانية الواحدة. وتتراوح ترددات الموجات الكهرمغنطيسية المختلفة بين حوالي عدة عشرات من الهيرتز بالنسبة للموجات فائقة الطول (أي منخفضة الطاقة)، وبين أكثر من ٢٣١٠ هيرتز بالنسبة للموجات شديدة القصر (أي فائقة الطاقة مثل إشعاعات جاما).

ويرتبط طول الموجة (بالمتر) وترددها f (بالهيرتز)، لأية موجة كهرمغنطيسية، مع سرعة الضوء C (بالمتر/ثانية) في الفراغ بعلاقة بسيطة هي:

$$C = \lambda f$$

وجدير بالذكر أن شدتي المجالين الكهربائي E والمغنطيسي B يرتبطان في أية لحظة بعلاقة بسيطة حددها ماكسويل وهي: E = C B، حيث C هي سرعة الضوء في الفراغ. ونظرا لضخامة سرعة الضوء من حيث المقدار (حوالي ثلاثمائة مليون متر في الثانية) من هنا يتضح أن شدة المجال الكهربائي تكون محسوسة من الناحية العملية بالمقارنة بشدة المجال المغنطيسي. لذلك، يسهل التقاط المركبة الكهربائية للموجة الكهرمغنطيسية بواسطة هوائيات الاستقبال اللاسلكي، وتقوم أسس عمل

جميع الهوائيات المستخدمة للبث أو الاستقبال على استخدام المركبة الكهربائية. وتتحدد الطاقة الكهرمغنطيسية E التي تحملها الموجة الكهرمغنطيسية (الفوتون) من تردد الموجة f بعلاقة خطية طردية استنتجها أينشتين وهي:

$$E = h f$$

حيث h هو ثابت يعرف باسم ثابت بلانك ويساوي ٦,٦٣ × ١٠$^{-٣٤}$ جول. ثانية.

ويمكن حساب الطاقة الإجمالية لحزمة من الموجات الكهرمغنطيسية وحيدة الطاقة التي تسري خلال وحدة الأسطح من مساحة عمودية على اتجاه الانتشار، وذلك بضرب عدد الموجات (الفوتونات) في طاقة كل موجة (فوتون) تخترق وحدة المساحات باستخدام الطاقة المحسوبة من علاقة اينشتين .

ومثلما تتميز الموجة الكهرمغنطيسية بطاقة (رغم عدم وجود كتلة لها) فإنها تتميز كذلك بزخم (Momentum) يمكن حسابه بيسر، بقسمة طاقة الموجة E على سرعة الضوء في الفراغ C، وفقاً للعلاقة التي اشتقها ماكسويل. وبالتالي فإنه عندما تسقط موجة كهرمغنطيسية (فوتون) على سطح ما وتمتص فيه يقع على هذا السطح ضغط يمكن حسابه بيسر من الزخم. وعندما يكون السطح عاكساً مثالياً يتضاعف الزخم الواقع على السطح وفقاً لقوانين انحفاظ الزخم، وبالتالي يتضاعف الضغط الواقع على هذا السطح.

١-٤ الفوتون والموجة الكهرمغنطيسية

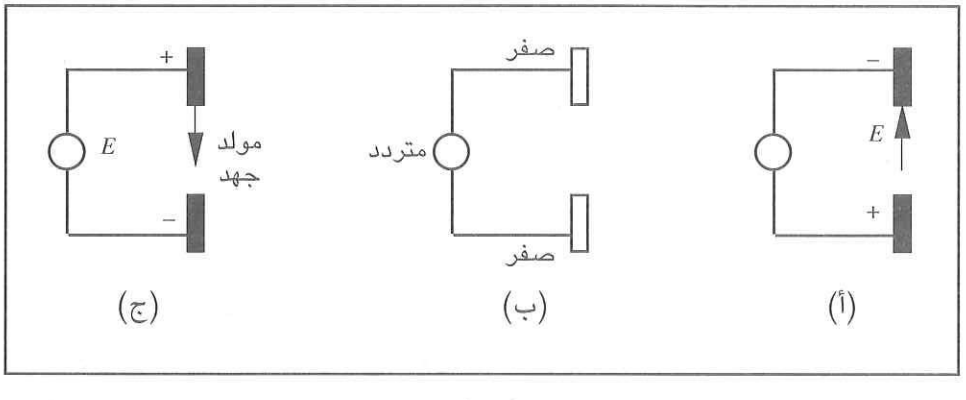
ثبت من دراستنا للضوء المرئي كأحد صور الموجات الكهرمغنطيسية أن الضوء يسلك مسلك الموجات الكهرمغنطيسية في بعض الظواهر كالانعكاس والانكسار والاستقطاب وغيرها. ويمكن شرح جميع هذه الظواهر بدقة في ضوء الطبيعة الموجية للضوء، أي على أساس اعتبار الضوء موجة كهرمغنطيسية. أما بالنسبة لبعض الظواهر الأخرى كاستطارة الضوء (أي حيوده عن مساره) أو الظاهرة الكهروضوئية (التي تتمثل في إمكانية تحرر وانطلاق الإلكترونات من أسطح بعض الفلزات والمواد عند سقوط الضوء عليها) ولبعض الظواهر الأخرى، فإنه يستحيل شرح هذه الظواهر استناداً إلى الطبيعة الموجية للضوء، وإنما يمكن شرح هذه الظواهر بيسر باعتبار أن

كل موجة يمكن تمثيلها بجسيم وحيد عديم الكتلة عند السكون يطلق عليه اسم فوتون Photon. ويقال أن هذا الفوتون هو حامل المجالين الكهربائي والمغنطيسي. وهكذا، تتصف الموجات الكهرمغنطيسية بخضوعها لمبدأ عرف باسم مبدأ الازدواجية "Duality" ، الذي يتمثل في أن الموجة الكهرمغنطيسية يمكن أن تسلك مسلك الموجة بالنسبة لبعض الظواهر ومسلك الجسيم عديم الكتلة بالنسبة لبعض الظواهر الأخرى.

لذلك، جرت العادة عند ذكر مصطلح موجة كهرمغنطيسية وحيدة (منفردة) أن يطلق عليها، كذلك، اسم الفوتون. وعند الحديث عن حزمة من الموجات فإنه يمكن التعبير عن ذلك بحزمة من الفوتونات.

١ـ٥ كيفية توليد بعض أنواع الموجات الكهرمغنطيسية

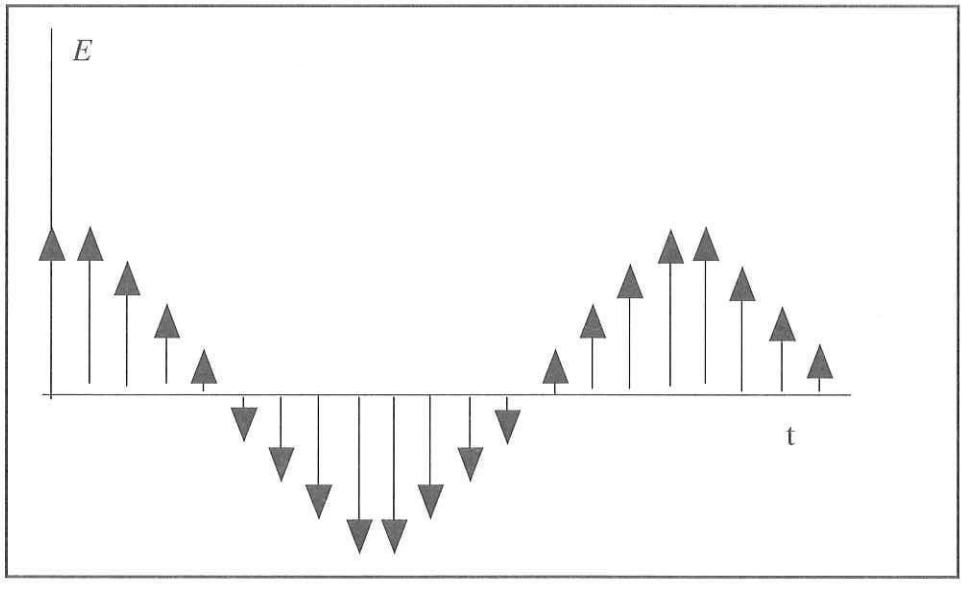
كان الفيزيائي هيرتز أول من تمكن من توليد الموجات الكهرمغنطيسية، وذلك بشحن كرتين صغيرتين منفصلتين ومتقاربتين بالجهد المتردد من خلال ملف حثي. وحاليا تطورت أساليب توليد الموجات الكهرمغنطيسية المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية، بدءاً من الموجات الطويلة، التي سيرد ذكرها في الفقرات التالية وحتى الموجات الدقيقة (المعروفة بالإنجليزية بالميكروويف)، وذلك بتوصيل الجهد الكهربائي المتردد، بالتردد المطلوب توليد الموجات به، إلى هوائي الإرسال. ويوضح شكل ١ـ٢ أسلوب توليد هذه الموجات. فعندما يشحن الجزء العلوي (شكل ١-٢-أ)



شكل ١- ٢

من الهوائي بشحنة كهربائية سالبة، مثلاً، والجزء السفلي بشحنة موجبة، يتولد بين قطبي الهوائي مجال كهربائي، يتحدد اتجاهه، افتراضا، من الشحنة الموجبة إلى السالبة، أي إلى أعلى في الشكل (١-٢-أ). ومع تناقص الشحنات الكهربائية تدريجياً على جزأي الهوائي الفلزيين تتناقص كذلك شدة المجال الكهربائي حتى تنعدم شدة المجال تماماً وتصبح مساوية للصفر عندما تكون الشحنة على جزأي الهوائي صفرا (شكل ١-٢-ب). ومع تغير نوع الشحنات في قطبي الهوائي بسبب تبدل اتجاه التيار المغذي للهوائي، يتغير اتجاه المجال الكهربائي ويصبح من أعلى إلى أسفل (شكل ١-٢-ج)، ثم يتلاشى هذا المجال من جديد عندما تنعدم الشحنتان على جزأي الهوائي. وهكذا، يتولد مجال كهربائي متردد يتغير بنفس معدل تغير التيار المتردد الذي يشحن قطبي الهوائي. وعادة، يتخذ المجال الكهربائي المتردد المتولد بين قطبي الهوائي صورة جيبية كالمبينة في شكل ١ـ٣

وكما سبق ذكره، فإن المجال الكهربائي المتردد يولد في المستوى العمودي عليه مجالاً مغنطيسياً متردداً بنفس التردد، وينتشر المجالان معاً من مركز الإرسال من الهوائي في الفراغ بسرعة الضوء.



شكل ١-٣

وعموما، توجد أنواع متعددة من الهوائيات التي توصل بدوائر توليد الذبذبات الكهربائية المترددة، كالدائرة المكونة من الملف الحثي والمكثف، أو الصمامات الخاصة بتوليد هذه الذبذبات عالية التردد. وعادة، تتخذ أبعاد الهوائيات قيما تتناسب مع أطوال الموجات التي يتم توليدها منها. فأبعاد الهوائي المستخدم لتوليد الموجات الطويلة تختلف اختلافا جوهريا عن تلك المستخدمة لتوليد الموجات الدقيقة. وفضلا عن الأبعاد تختلف الهوائيات في أشكالها حسب الغرض المستخدمة من أجله. فمنها الأشكال المخصصة لبث موجاتها في جميع الاتجاهات، ومنها ما يبث موجاته في صورة حزمة موجهة في اتجاه معين، أو مستقطبة استقطابا محددا. وعندما يقال أن الهوائي مستقطب استقطابا رأسيا فهذا يعني أن المركبات الكهربائية للموجات الكهرمغنطيسية تنتشر في المستوى الرأسي، أي العمودي على سطح الأرض، في حين تنتشر المركبات المغنطيسية لهذه الموجات في المستوى الأفقي، أي الموازي لسطح الأرض.

الفصل الثاني

شرائح الأشعة الكهرمغنطيسية (مصادرها واستخداماتها)

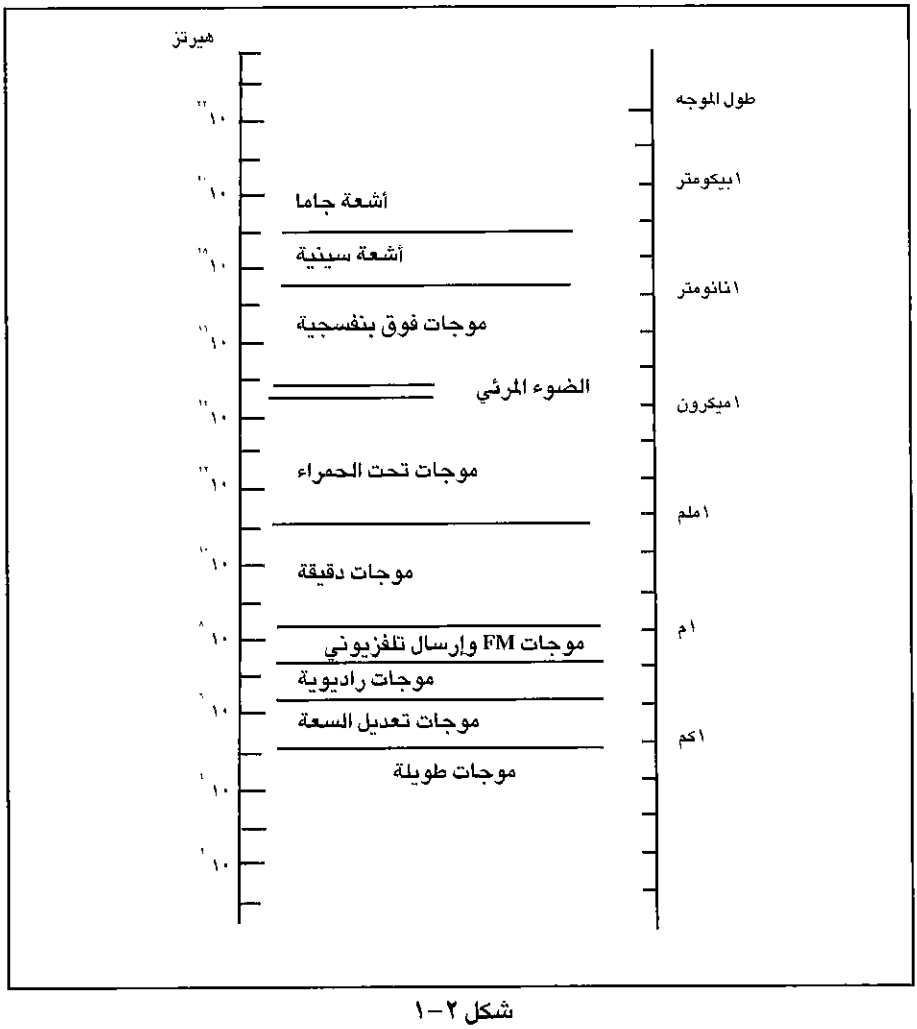
٢-١ نبذة عامة

سبق الإشارة إلى أن جميع الموجات الكهرمغنطيسية، بدءاً من أطول هذه الموجات التي يبلغ طولها حوالي ٦ آلاف كيلومتر، وهي الموجات التي تتولد حول خطوط نقل التيار الكهربائي المتردد (٥٠ - ٦٠ هيرتز تبعا للدولة) المستخدم في الحياة المدنية وحتى أقصر هذه الموجات وهي أشعة جاما عالية الطاقة التي يبلغ طول موجاتها حوالي فمتومتر ($١٠^{-١٥}$ من المتر)، تنتشر في الفراغ بسرعة ثابتة هي سرعة الضوء. ويقسم هذا المدى شديد الاتساع من الموجات الكهرمغنطيسية ضمن عدة شرائح وفقاً لطول الموجة أو لترددها. وتتميز كل شريحة بخصائص معينة جعلتها صالحة للاستخدام في مجال محدد. وجدير بالذكر أنه لا توجد قيم حدية فاصلة بين الشريحة والأخرى وإنما تتداخل الشرائح فيما بينها تداخلاً كبيراً. ويبين شكل ٢-١ الشرائح المختلفة لهذه الموجات تبعاً لطول الموجة أو لترددها، وفيما يلي سوف تستعرض الشرائح الرئيسة والفرعية للأشعة الكهرمغنطيسية، مرتبة من الموجات الأكبر طولاً نحو الأصغر (أي من الأقل تردداً أو طاقة نحو التردد والطاقة الأكبر)، مع الإشارة باختصار شديد إلى مصادر هذه الشرائح وأهم تطبيقاتها.

٢-٢ شريحة الموجات فائقة الطول

وهي شريحة الموجات التي يتراوح طولها بين حوالي ٦ آلاف كيلومتر وحتى ما يقرب من ألف متر، أي يتراوح ترددها بين ٥٠ وحوالى ١٠×١^{٥} هيرتز. وتتولد بعض موجات هذه الشريحة حول خطوط نقل التيار الكهربائي المتردد المستخدم في الحياة المدنية، الذي يتراوح تردده ما بين ٥٠ إلى ٦٠ هيرتز، وحول بعض مصادر التيار المتردد الأخرى. ويتم توليد الموجات الكهرمغنطيسية الطويلة التي تحتل شريحة من الأطوال الموجية تتراوح ما بين عدد قليل من الكيلومترات والى حوالي ألف متر لاستخدامها لأغراض الاتصالات المحلية لمسافات محدودة. ويعود السبب في ذلك

لانخفاض ترددات (أي طاقات) موجات هذه الشريحة مما يجعلها تتصف بقدرتها المحدودة للغاية على الانتشار في الفضاء لمسافات بعيدة. لذلك، يصعب استخدام هذه الشريحة إلا لبعض أغراض الاتصالات اللاسلكية المحلية مثل الإرسال الإذاعي على الموجات الطويلة. ويتم توليد الموجات الطويلة المستخدمة في الاتصالات باستخدام دوائر مهتزة تتكون أساسا من عنصرين هما ملف حثي ومكثف ، ويعتمد تردد الموجات المتولدة على مقداري هذين العنصرين.



شكل ٢-١

٢-٣ شريحة موجات الترددات الراديوية Radiofrequency band

وهي شريحة الموجات التي تتراوح أطوالها الموجية بين حوالي ١ كيلومتر الى حوالي المتر الواحد، أي التي يتراوح ترددها بين حوالي ٣٠٠ كيلوهيرتز وحوالي ٣٠٠ ميغاهيرتز. وتستخدم هذه الشريحة من الموجات في البث الإذاعي والتلفزيوني وفي الرادار، وكذلك في عمليات الاتصالات نظراً لزيادة طاقة الموجات وقدرتها بالتالي على الوصول لمسافات بعيدة. وتنقسم هذه الشريحة إلى عدة شرائح فرعية هي:

٢-٣-١ شريحة الموجات الإذاعية

تتراوح أطوال موجات هذه الشريحة بين حوالي ١٠٠٠ متر وحتى حوالي ١٠ أمتار (أي يتراوح ترددها بين حوالي ٣٠٠ كيلوهيرتز، ٣٠ ميغاهيرتز). وتتولد هذا الموجات باستخدام مذبذبات تتضمن أساساً دارات تشمل ملف حثي ومكثف، تحدد قيمهما قيم تردد الموجات المتولد. وتعرف هذه الشريحة بالنسبة للاتصالات اللاسلكية بشريحة تعديل السعة Amplitude modulation band (AM). حيث يتم في جهاز البث، تعديل سعة الموجات التوافقية البسيطة الحاملة ذات التردد الثابت ومتساوية السعة إلى موجات متغيرة السعة وفقا للموجة الصوتية ولها نفس التردد. وفي جهاز أو محطة الاستقبال يتم إعادة تعديل الموجة للتخلص من الموجة التوافقية البسيطة والحصول على الموجة الصوتية.

ويعود السبب في ضرورة التعديل إلى أن ترددات الموجات الصوتية أو الموسيقى تتطلب شريحة يبلغ اتساعها حوالي ٣٠٠٠ هيرتز للأصوات البشرية، وحوالي ٢٠٠٠٠ هيرتز للموسيقى. والموجات الكهرمغنطيسية بهذه الترددات لا يمكنها الانتقال بعيداً، كما ورد، سواء في الفراغ أو الهواء. لذلك تحمَّل موجات الأصوات البشرية والموسيقى على موجات توافقية بسيطة عالية التردد تقع في مدى الموجات الطويلة (طول موجي في حدود ١٠٠٠ متر) والمتوسطة (مئات قليلة من الأمتار) والقصيرة (عدة أمتار أو عشرات قليلة من الأمتار). وتعرف الموجة التوافقية البسيطة عالية التردد بالموجة الحاملة. وبعد تعديل الموجة الحاملة تبث الموجات المعدلة لمسافات بعيدة نظراً لقدرة هذه الموجات على اختراق الهواء والفراغ.

ومن خصائص الموجات الإذاعية أنها تنعكس على الطبقة الأيونية المحيطة بالغلاف الجوي فترتد إلى الأرض ويمكن التقاطها بواسطة الهوائيات المختلفة. وعند محطة الاستقبال يعاد تعديل الموجة، حيث يتم التخلص من الموجة التوافقية البسيطة الحاملة وتبقى الموجة الصوتية أو الموسيقية، وبالتالي يتم سماع صوت مطابق تماماً للصوت الأصلي.

٢-٣-٢ شريحة موجات البث التلفزيوني أو شريحة تعديل التردد

FM Frequency modulation

وتتراوح أطوال موجات هذه الشريحة بين حوالي ١٠ أمتار وحتى حوالي ٣٠ سم، أي يتراوح ترددها بين حوالي ٣٠ ميغاهيرتز، وحتى حوالي ١ غيغا هيرتز (الغيغا = 10^9). وجدير بالذكر أن الشرائح الفرعية للموجات الإذاعية الطويلة والمتوسطة والقصيرة لا تصلح للإرسال التلفزيوني لذلك تستخدم الموجات الأقصر طولاً (أي الأكبر تردداً) لهذا النوع من الإرسال. إلا أن الموجات الأكثر تردداً لا تنعكس على طبقة الأيونوسفير لطاقتها الأكبر وبالتالي لقدرتها على اختراق طبقة الأيونوسفير دون أن ترتد للأرض. لذلك، يحتاج الإرسال التلفزيوني إلى محطات استقبال وتقوية وإعادة إرسال تحقق رؤية مباشرة في خط مستقيم بين محطة الإرسال ومحطة الاستقبال والتقوية وإعادة البث، وكذلك رؤية مباشرة ومستقيمة بين هذه المحطة الأخيرة وجهاز الاستقبال في المنازل. لهذا الغرض، تستخدم محطات الدعم (الاستقبال والتقوية وإعادة البث) الأرضية أو الأقمار الصناعية التي تدور حول الأرض.

٢-٤ شريحة الموجات الدقيقة Microwave band

تتراوح أطوال موجات هذه الشريحة بين ٣٠ سم وحوالي المليمتر، أي يتراوح ترددها بين ١ غيغا هيرتز، حتى ٣٠٠ غيغا هيرتز. وتستخدم موجات هذه الشريحة في عمليات الاتصال. كذلك، تستخدم شريحة فرعية من هذه الشريحة في العديد من عمليات التسخين (مثل أفران الموجات الدقيقة المعروفة بأفران الميكروويف المستخدمة في الطهي).

وفي بعض المراجع يتم دمج شريحتي الترددات الخاصة بالإرسال التلفزيوني أو شريحة تعديل التردد بشريحة الموجات الدقيقة ضمن شريحة واحدة يتراوح تردد موجاتها بين ٣٠ ميغا هيرتز ، ٣٠٠ غيغا هيرتز.

وتتوزع شريحة الموجات الدقيقة على عدد من الشرائح الفرعية التي تحدد نطاق الاستخدام. ويبين جدول (٢-١) أسماء هذه الشرائح ومدى كل شريحة فرعية منها.

اسم الشريحة الفرعية	التردد (ميغاهيرتز)
L	١٠٠٠ ـ ١٤٠٠
S	٢٦٠٠ـ٣٩٥٠
C	٣٩٥٠ ـ ٥٩٥٠
X	٨٢٠٠ ـ ١٢٤٠٠
Ku	١٢٤٠٠ـ١٨٠٠٠
K	١٨٠٠٠ ـ ٢٦٠٠٠
Ka	٢٦٠٠٠ ـ ٤٠٠٠٠

جدول (٢-١) الشرائح الفرعية للموجات الدقيقة.

ويعود التوسع الهائل في تطبيقات الموجات الدقيقة في الإرسال والرادار والاتصالات عموماً إلى بعض الخصائص المميزة لهذه الموجات، التي تتمثل في إمكانية بثها خلال الفضاء (الهواء أو الفراغ) في حزم كثيفة ومركزة تشبه إلى حد كبير حزمة الضوء. فضلاً عن ذلك، يمكن لحزمة الموجات الدقيقة أن تحمل قدراً من المعلومات يزيد كثيراً على القدر الذي تحمله موجات الإرسال الإذاعي (أي الموجات الراديوية). فمحطة الإرسال التلفزيوني الواحدة تحتاج إلى شريحة ترددات يبلغ اتساعها ٤,٥ ميغاهيرتز. وبالتالي، يستحيل تشغيل أكثر من ٥ -٦ محطات إرسال في آن واحد ضمن مدى من الترددات لا يزيد على ٣٠ ميغاهيرتز.

وعند استخدام الموجات الدقيقة في الاتصالات الرادارية يبث الرادار نبضة قصيرة الامتداد الزمني وكثيفة وشديدة التركيز من الموجات الدقيقة عالية التردد من

خلال هوائي الإرسال. وعند اصطدام هذه النبضة من الموجات بأحد الأجسام (خاصة الفلزية) تنعكس بعض الطاقة (بعض الموجات) من سطح هذا الجسم وتنتشر في الفراغ، ويعود جزء منها إلى هوائي الرادار المتصل بجهاز استقبال، فيلتقطها الهوائي ويضخمها جهاز الاستقبال، وبالتالي يسهل الكشف عن هذا الجسم العاكس. ويمكن تحديد المسافة بين الجسم والرادار بقياس الفاصل الزمني بين النبضة المنبعثة والنبضة المنعكسة (المرتدة). أما اتجاه الجسم (الهدف) فيتحدد من الاتجاه الذي يوجه إليه الهوائي. ومن هذين القياسين يتم تحديد موقع الجسم (الهدف) ضمن إطار الإحداثيات القطبية الذي يقع جهاز البث الراداري في نقطة الأصل لهذه الإحداثيات. وبإجراء القياسات بالتتابع بصفة متواصلة بالنسبة للأجسام المتحركة يمكن بيسر تعيين سرعة الجسم (الهدف) واتجاه حركته.

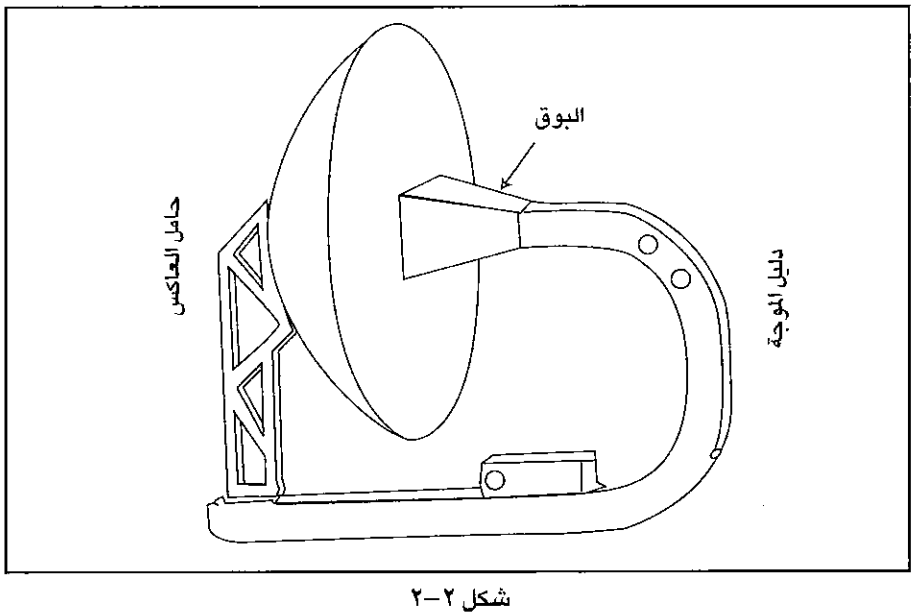
٢-٤-١ هوائيات البث للموجات الدقيقة

يعتبر تركيز الطاقة المبثوثة للموجات الرادارية الدقيقة في حزمة كثيفة وضيقة من الأمور التي يسهل تحقيقها عملياً، نظراً لأن أبعاد هوائي الموجات الدقيقة يمكن أن يتجاوز كثيراً الأطوال الموجية لموجات الحزمة الرادارية المبثوثة. فتركز أي موجة منبثة بواسطة هوائي في اتجاه معين يتطلب أن يكون قطر طبق الهوائي أكبر بمئات المرات بالمقارنة بطول الموجة المنبثة. وبالتالي، فإنه يمكن تحقيق مثل هذا الأمر بالنسبة للموجات الدقيقة بواسطة أطباق محدودة الأبعاد، وهو الأمر الذي يصعب بل يستحيل تحقيقه عمليا بالنسبة للموجات الراديوية.

ويتكون هوائي الإرسال للموجات الدقيقة عموماً من جهاز التغذية بالموجات الدقيقة مثل ثنائي القطب أو البوق الموصل بمولد الموجات الدقيقة وعاكس. والعاكس عبارة عن طبق في صورة قطع مكافئ كالذي نراه فوق أسطح المباني وفي بعض هوائيات الإرسال. وفي حالة ثنائي القطب تنبعث الطاقة الكهرمغنطيسية من المولد وتوجه من خلال البوق نحو العاكس. والبوق هو دليل للموجات الكهرمغنطيسية توجه خلاله الموجات في اتجاه الطبق المشكل على صورة قطع مكافئ. ويركب مصدر التغذية بالموجات الدقيقة (شكل٢-٢) في بؤرة الطبق العاكس بحيث يوجه موجاته

نحـوه. وبالتـالي، فـإنه وفـقاً لقـوانين الانعكاس يجب أن تنعكس حـزمـة الموجـات الكهرمغنطيسية من العاكس بحيث تكون متوازية (من الناحية النظرية). إلا أنه من الناحية العملية تنطلق الحزمة من الطبق متضمنة زاوية انتشار وليست متوازية تماماً، حيث تزداد مساحة مقطع الحزمة كلما بعدت المسافة عن سطح الطبق. ويعرف معدل اتساع مقطع الحـزمـة بعرض الحـزمـة "beamwidth" ويعين عرض الحـزمـة عادة بالدرجات ويمثل زاوية انحراف المستقيم الواصل بين مركز الطبق وحافة مقطع الحزمة، عند مسافة من الطبق تبلغ عندها القدرة نصف قيمتها الأصلية، وبين محور الحـزمة. كذلك، يتميز أي هوائي بمعامل آخر يطلق عليه كسب الهوائي. ويعرف هذا المعامل على أنه النسبة بين كثافة النبضة المنبثة في الحزمة على مسافة ما من الطبق إلى كثافة النبضة عند نفس المسافة لو توزعت النبضة توزعاً متجانساً في جميع الاتجاهات. وكلما زاد مقدار هذا المعامل كان الهوائي من نوع أفضل. ويرتبط هذا المعامل بمساحة فتحة الهوائي وبطول الموجة المنبثة (بعلاقة رياضية بسيطة.

ومن الأمور الهامة من وجهة نظر تأثيرات الهوائي على الكائنات الحية كل من قدرة الخرج لمحطة الإرسال للموجات الدقيقة والكثافة المتوسطة للقدرة



شكل ٢-٢

٢ـ٤ـ٢ استخدام الموجات الدقيقة في التسخين

انتشر استخدام شرائح معينة من الموجات الدقيقة في عمليات التسخين. فعند سقوط حزمة الموجات الدقيقة على مادة ما فإنه قد تنعكس هذه الموجات على سطح المادة كما يحدث على الفلزات ومواد أخرى، وقد تخترق هذه الموجات المادة مع فقد نسبة معينة من طاقتها فيها، مثلما يحدث في الزجاج، وقد تمتص طاقة الموجات بأكملها في المادة مثلما يحدث في أنواع متعددة من المواد كالمواد التي يتكون منها الجسم البشري ومواد الأغذية المختلفة. وعند امتصاص طاقة الموجات الدقيقة في المادة المتعرضة ترتفع درجة حرارة هذه المادة.

ويعود ارتفاع درجة حرارة المادة لسببين. يكمن السبب الأول في نوع آلية التسخين، حيث يتم التسخين وفقا لقوانين جول الفيزيائية التي تحدد كمية الحرارة المتولدة عند مرور تيارات كهربائية في المادة. وأنسجة الجسم البشري وجميع الأغذية تتضمن أعدادا هائلة من الأيونات المشحونة. وتستحث المجالات الكهربائية، التي تنشأ داخل المادة بفعل المجال الكهربائي للموجات، تيارات أيونية تؤدي بدورها للتسخين. أما السبب الثاني فيكمن في آلية التفاعل المتبادل بين الجزيئات القطبية في المادة وبين المجال الكهربائي عالي التردد للموجات الدقيقة. فالمجال الكهربائي المتردد يؤدي إلى اهتزاز هذه الجزيئات اهتزازاً منتظما بنفس تردد المجال الكهربائي. وهذه الاهتزازات تخضع لمقاومة قوى أخرى هي قوى الترابط مع الجزيئات الأخرى. وبالتالي، يتحول الشغل الذي يبذله المجال الكهربائي المتغير للتغلب على القوى المقاومة إلى طاقة حرارية.

وهكذا، تستخدم الموجات الدقيقة في عمليات التسخين. فعلى سبيل المثال، تستخدم شريحة الترددات ٢٧ ميغاهيرتز استخداماً واسعاً في الصناعة لتسخين العازلات (أي المواد غير الموصلة للكهرباء) كالخشب الجاف والبلاستيك لأغراض لصقها وكذلك في تسخين الأنسجة الصناعية عند معالجتها. كذلك، تستخدم الموجات الدقيقة في شريحة الترددات ٩١٥ ميغاهيرتز، ٢٤٥٠ ميغاهيرتز للتسخين سواء للأغراض الصناعية أو للأغراض المنزلية. ويحدث التسخين عند هاتين الشريحتين بصورة سريعة للغاية. فعند الحاجة لتسخين مادة عازلة توضع هذه المادة بين قطبين يطبق عليهما جهد متردد بالتردد المحدد، وتصل شدة مجاله بين القطبين إلى

حوالي ١٠٠٠٠٠ فولط/متر. ويستخدم مثل هذا المجال لتسخين عدد من المواد كالخزف والخشب الجاف والورق والبلاستيك وغيرها، وذلك من خلال آلية اهتزاز الجزيئات القطبية تحت تأثير المركبة الكهربائية للموجات الدقيقة.

وينتشر استخدام أفران الموجات الدقيقة في عمليات طبخ وتسخين الأطعمة نظراً للسرعة الكبيرة التي تتم بها هذه العمليات. ففي الأفران العادية التي تعمل بالكهرباء أو الغاز الطبيعي يتم أولاً تسخين الهواء الموجود في حيز الفرن وتسخين جدران هذا الحيز، ثم تنتقل الحرارة بعد ذلك من الهواء الساخن إلى سطح الطعام، ثم تسري الحرارة من سطح الطعام إلى الطبقات العميقة للطعام المراد طهيه أو تسخينه بظاهرة التوصيل الحراري. أما في أفران الموجات الدقيقة فإنه لا يتم تسخين الهواء داخل الفرن أو جدران الفرن وإنما تمتص طاقة الموجات الدقيقة بالكامل في الطعام. وفضلاً عن ذلك فإنه نظراً لقدرة الموجات الدقيقة على اختراق الطعام لعمق يتراوح ما بين ١ إلى ٢سم تحت سطح الطعام فإنه يسخن الطعام على أعماق مختلفة في نفس الوقت وبالتالي يكون حجم الطعام المسخن بالتوصيل الحراري محدوداً للغاية. وهكذا، فإن الكفاءة العالية في استخدام الطاقة لتسخين وطهي الطعام دون غيره من المواد المحيطة، والعمق الكبير للتسخين يؤديان معاً إلى تسخين وطهي الطعام بسرعة فائقة في أفران الموجات الدقيقة بالمقارنة بالمواقد الأخرى. ويعتمد زمن طهي الطعام عادة على كمية المادة الخاضعة للطهي، إلا أن هذه المدة تقصر كثيراً بالمقارنة بالأفران العادية وتبلغ عدداً قليلاً من الدقائق.

وعموماً، يعتمد عمق التسخين بأي من آليتي التسخين المذكورتين على عدد من العوامل منها كثافة قدرة حزمة الموجات الدقيقة وترددها، وسمك المادة الخاضعة للتسخين وتوصيليتها الحرارية، وكذلك على نفاذية هذه المادة. ويبلغ عمق الاختراق للموجات الدقيقة ذات التردد ٢٤٥٠ غيغاهيرتز حوالي ١,٦٧ سم للنسيج العضلي (أي اللحوم) وحوالي ٨,١ سم عندما يكون النسيج دهنيا.

ويتكون فرن الموجات الدقيقة من:

- مولد لهذه الموجات يستخدم نوعاً من الماغنترونات (صمامات توليد الترددات العالية) بقدرة خرج تتراوح بين ٦٠٠ ، ١٠٠٠ واط

- دليل موجي لنقل الموجات الدقيقة من المولد إلى تجويف الفرن
- تجويف الفرن
- هزاز فلزي دوار يؤدي إلى تشكيل مجال متجانس من الموجات الدقيقة داخل تجويف الفرن وذلك بمنع تكون الموجات المستقرة داخل هذا التجويف.

وفضلاً عن هذه المكونات الرئيسة الأربعة فإنه يركب، لأغراض الأمان والسلامة، قفل كهربائي في باب الفرن بحيث يقطع التيار الكهربائي عن مولد الموجات الدقيقة ليتوقف توليد هذه الموجات بمجرد فتح باب الفرن.

وهنا ينبغي الإشارة إلى أنه في حالة عدم انغلاق باب الفرن انغلاقاً تاماً يمكن أن تتسرب الموجات الدقيقة من داخل حيز الفرن إلى خارجه من خلال الفرجة الضيقة بين الباب وجسم الفرن، مما قد يؤدي إلى حدوث مخاطر صحية على المستخدم. لذلك، فإن التأكد من تمام إغلاق باب الفرن يعتبر من أهم مسوغات السلامة والأمان عند التعامل مع أفران الموجات الدقيقة.

وقد استخدمت خصائص الموجات الدقيقة، كذلك، في مجال التسخين للمعدات الطبية المختلفة وحتى لبعض الأنسجة البشرية داخل الجسم البشري.

٢ـ٥ شريحة الأشعة تحت الحمراء

هي شريحة الموجات التي يتراوح ترددها ما بين حوالي ٣٠٠ غيغا هيرتز (نهاية شريحة الموجات الدقيقة) وإلى $٤,٢ \times ١٠^{١٤}$ هيرتز (بداية شريحة الضوء المرئي) أي أن تردد موجاتها يقع في الترتيب تحت تردد الضوء الأحمر مباشرة. وتعرف هذه الشريحة كذلك، باسم شريحة الأشعة الحرارية (Heat radiation) وتتراوح أطوال أمواجها بين حوالي المليمتر وتستمر حتى تبلغ أطول موجات الضوء المرئي وهو اللون الأحمر، الذي يبلغ طول موجته ٠,٧ ميكرومتر (الميكرومتر يساوي جزء من مليون جزء من المتر). وتتولد موجات هذه الشريحة من الأجسام والجزيئات الساخنة. ولا تستطيع هذه الأشعة الانتشار بعيداً نظراً لسهولة امتصاصها في صورة حرارة، حيث تؤدي هذه الأشعة إلى إثارة وتحريك ذرات المادة نتيجة للحركة الاهتزازية أو

الانتقالية التي تكتسبها هذه الذرات بفعل الموجات، مما يؤدي بالتالي إلى ارتفاع درجة حرارة الجسم الذي تسقط عليه. وتستخدم الإشعاعات تحت الحمراء في الوقت الحاضر استخداماً واسعا في العديد من التطبيقات العلمية والعملية بما في ذلك أجهزة الرؤية الليلية وفي أجهزة التصوير بالأشعة تحت الحمراء وفي القياسات الطيفية الاهتزازية. ومن الاستخدامات الهامة لموجات هذه الشريحة في المجال الطبي استخدامها في التسخين في عمليات العلاج الطبيعي.

٢-٦ شريحة الضوء المرئي

إن الشكل المحسوس لجميع البشر بل ولمعظم الكائنات الحية من الموجات الكهرمغنطيسية هو الضوء المرئي وطيفه الذي تستطيع العين البشرية أن تميزه. وينتج الضوء عموماً، عند تسخين الأجسام لدرجات حرارة عالية، نتيجة لإعادة ترتيب الإلكترونات في الذرات والجزيئات. وتتراوح أطوال موجات الضوء المرئي بين حوالي ٠,٧ ميكرومتر للضوء الأحمر ويقل حتى يصل إلى حوالي ٠,٤ ميكرومتر للضوء البنفسجي (أي يتراوح تردد موجاته بين ٤,٢ × ١٠^{١٤} هيرتز للضوء الأحمر وحتى ٧,٥ × ١٠^{١٤} هيرتز للضوء البنفسجي). ويتكون طيف الضوء المرئي من سبعة ألوان مرتبة حسب الطول الموجي من الأكبر للأصغر كالتالي: الأحمر، والبرتقالي، والأصفر، والأخضر، والأزرق، والنيلي، والبنفسجي. وتعتبر الشمس المصدر الرئيس للضوء المرئي ضمن حدود المجموعة الشمسية. وتعتمد حساسية العين البشرية للضوء على الطول الموجي له وتبلغ هذه الحساسية ذروتها عند الطول الموجي المتوسط (حوالي ٠,٥٦ ميكرومتر أي ما بين الضوء الأصفر والأخضر. والضوء المرئي من أهم مقومات الحياة حيث يمثل الطاقة الأساسية في عملية التمثيل الضوئي في النبات المصدر الرئيس للغذاء والأكسجين على ظهر البسيطة.

٢-٧ شريحة الأشعة فوق البنفسجية

يعني مصطلح الأشعة فوق البنفسجية الإشعاعات الكهرمغنطيسية التي يفوق ترددها تردد الضوء البنفسجي ، وتمتد الأطوال الموجبة لهذه الشريحة بين الطول

الموجي للضوء البنفسجي الذي يبلغ حوالي ٠,٣٨ ميكرون وحتى حوالي ١ نانومتر (النانومتر= $١٠^{-٩}$ متر)، أي أنه يتراوح تردد الموجات فوق البنفسجية بين ٧,٥ × ١٤١٠ وإلى ٣ × $١٠^{١٧}$ هيرتز. وتتداخل هذه الشريحة تداخلاً عريضاً مع شريحة الأشعة السينية التي سيرد ذكرها لاحقاً.

وتعتبر الشمس أحد أهم مصادر الأشعة فوق البنفسجية كما يمكن إنتاج هذه الأشعة بيسر بواسطة مصابيح خاصة شديدة الوهج، لاستخدامها في العديد من الأغراض العلمية والتسخين. وتمتص معظم الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس بواسطة ذرات وجزيئات الطبقة العليا من الغلاف الجوي المحيط بالأرض والمعروفة بطبقة الستراتوسفير، الأمر الذي يقي الإنسان وكثيراً من الكائنات الحية الأخرى من التأثيرات الضارة لهذه الأشعة. وتعود قدرة طبقة الاستراتوسفير على امتصاص الأشعة فوق البنفسجية إلى وجود نسبة عالية من غاز الأوزون (وهو عبارة عن جزيئات أكسجين ثلاثية الذرات أي O_3) في هذه الطبقة، الأمر الذي يمثل درعاً ضد هذه الإشعاعات، حيث تتفاعل الموجات فوق البنفسجية، وخصوصاً الموجات عالية الطاقة منها، مع جزيئات الأوزون محولة طاقة هذه الإشعاعات إلى حرارة تؤدي بالتالي إلى تسخين طبقة الاستراتوسفير.

٢-٨ شريحة الأشعة السينية

الأشعة السينية (أي المجهولة عندما اكتشفها روينتغن عام ١٨٩٦م) هي موجات كهرمغنطيسية تتراوح أطوال موجاتها بين عدد محدود من النانومتر وحتى حوالي البيكومتر (البيكومتر = $١٠^{-١٢}$ متر)، أي أنه تتراوح ترددات موجاتها بين حوالي ١ × $١٠^{١٧}$ وحتى حوالي ٣ × $١٠^{٢٠}$ هيرتز. وتتداخل هذه الشريحة تداخلاً واسعاً مع شريحتي الترددات التي تسبقها وهي الأشعة فوق البنفسجية والتي تليها وهي أشعة جاما. وتنتج معظم الأشعة السينية المستخدمة في التطبيقات العملية من تباطؤ الإلكترونات المسرعة لطاقات عالية نسبياً، عندما تصدم هذه الإلكترونات أهدافا مادية خاصة الأهداف الفلزية الثقيلة. لذلك، يطلق على هذا النوع من الأشعة السينية اسم الأشعة السينية الانكباحية. وتتولد هذه الأشعة من شاشات أجهزة التلفزة وشاشات الحاسبات بتراكيز متفاوتة تزداد بزيادة فرق الجهد الكهربائي المستخدم لتعجيل

الإلكترونات في هذه الشاشات. لذلك ينصح دائما بالجلوس بعيدا عن هذه الشاشات بمسافات محددة خاصة بالنسبة للأطفال، أو استخدام دروع مضادة لهذه الأشعة حول الشاشة لخفض تركيزها.

كذلك، يوجد نوع آخر من الأشعة السينية التي تنطلق عندما تنتقل إلكترونات المدارات الذرية البعيدة إلى مدارات أقرب للنواة، أي عندما تتخلص الذرة من إثارتها (أي من الطاقة الزائدة فيها). وتنطلق الأشعة السينية، في هذه الحالة، بقيم طاقة مميزة لذرة كل عنصر وتختلف عن القيم المميزة للعناصر الأخرى. ولذلك، يعرف هذا النوع من الأشعة السينية بالأشعة المميزة للعناصر. وبالتالي تعتبر الأشعة السينية المميزة بصمة من بصمات العنصر المعين. ويمكن الكشف عن العناصر المختلفة مهما قلت تراكيزها في العينات المختلفة باستحثاث الأشعة السينية المميزة للعناصر وقياس أطيافها. وقد تطورت هذا التقنية تطوراً هائلاً في ضوء تعدد وسائل إثارة العناصر وأصبحت من أهم تقنيات الاختبارات غير الإتلافية للمواد والعناصر.

وتستخدم الأشعة السينية في المجال الطبي في تشخيص العديد من الأمراض، وكذلك في علاج العديد من الأورام السرطانية السطحية، وفي تعقيم الكثير من الأدوات والمنتجات والعقاقير الطبية. أما في مجال التطبيقات الصناعية فتستخدم الأشعة السينية في العديد من المجالات مثل سبر المواد واختبار جودتها والكشف عن العيوب الصناعية فيها.

كذلك، تستخدم الأشعة السينية لدراسة التراكيب البللورية للمواد وسبرها نظراً لأن طول موجات هذه الأشعة يقترب كثيراً من المسافات الفاصلة بين الذرات في هذه التراكيب.

ورغم المنافع الجمة والعظيمة للأشعة السينية إلا أن لها مخاطر وخيمة على الإنسان، سوف يتم التعرف عليها عند الحديث عن مخاطر الأشعة المؤينة.

٢-٩ شريحة أشعة جاما

أشعة جاما هي موجات كهرمغنطيسية عالية الطاقة تنطلق من نواة الذرة عندما تتفكك هذه النواة عبر تفكك ألفا أو بيتا وتتكون نواة جديدة وليدة تحمل قدراً من طاقة

الإثارة، أو عند إثارة أية نواة عادية (أي غير قابلة للتفكك) بأي طريقة من طرق الإثارة المختلفة. وتتداخل شريحة ترددات أشعة جاما تداخلاً كبيراً مع شريحة ترددات الأشعة السينية، وتتراوح ترددات أشعة جاما بين حوالي $^{18}10$ هيرتز وأكثر من $^{23}10$ هيرتز لإشعاعات جاما عالية الطاقة.

ورغم السلوك المتشابه تماماً لكل من الأشعة السينية وإشعاعات جاما إلا أنه ينبغي إدراك أن الأشعة السينية تنطلق عن تباطؤ الجسيمات المشحونة وخاصة الإلكترونات أو عن انتقال الإلكترونات من مدارات أبعد عن النواة إلى مدارات أقرب منها. أما أشعة جاما فإنها تنطلق عن النوى وليس لها علاقة بالإلكترونات المدارية. وتتميز أشعة جاما بقدرة هائلة على اختراق المواد نظراً لطاقتها العالية ولكونها موجة كهرمغنطيسية عديمة الشحنة، حيث يمكن أن تخترق جداراً خرسانيا ذات سماكة كبيرة وأن تجتازه دون أن تفقد أي جزء من طاقتها. وتستخدم أشعة جاما، في الوقت الحاضر، في العديد من المجالات الطبية للتشخيص والعلاج والتعقيم، وفي المجالات الصناعية في إكساب المواد خصائص خاصة، وفي تحسين خصائص العديد من المنتجات الصناعية، وفي اختبارات الجودة والكشف عن العيوب الصناعية، وفي تطبيقات كثيرة منها الطبية والصناعية والزراعية.

ورغم الفوائد المتعددة لإشعاعات جاما إلا أن مخاطرها وخيمة على الإنسان وعلى الكائنات الحية الأخرى التي تتعرض لكميات منها. وسوف يرد ذكر هذه المخاطر عند الحديث عن مخاطر الإشعاعات المؤينة .

الفصل الثالث

التأثيرات الضارة لبعض أنواع الموجات الكهرمغنطيسية

٣-١ مقدمة

بات من المؤكد أنه رغم الفوائد الجمة للشرائح المختلفة من الموجات الكهرمغنطيسية إلا أن معظم هذه الشرائح تتميز بخصائص بيولوجية هدامة بالنسبة للإنسان وللكائنات الحية عموما. وسوف نحاول خلال الفقرات التالية التعرف على أخطار بعض شرائح هذه الموجات. أما بالنسبة للموجات الكهرمغنطيسية عالية الطاقة المتمثلة في الأشعة السينية وإشعاعات جاما فسوف يرجأ الحديث عن مخاطرها إلى الجزء الذي يتناول التعريف بالأشعة المؤينة ومخاطرها.

٣-٢ التأثيرات الضارة للأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي

بات من المعروف من عصور طويلة أن الطاقة الضوئية يمكن أن تلحق الأذى بجلد الإنسان. فالتعرض لجرعات كبيرة من ضوء الشمس يمكن أن يؤدي إلى حدوث التهابات وحروق في الجلد قد يزول أثرها بعد فترة معينة وقد تبقى آثارها في صورة ندب دائمة في الجلد، ربما تتحول إلى إصابات سرطانية جلدية مختلفة.

ويعود التلف الحاصل في الجلد إلى امتصاص طبقة الجلد السطحية للطاقة الضوئية الساقطة عليه. وتتمثل آلية تلف الجلد في المقام الأول في ارتفاع درجة حرارة الجزء المتعرض للضوء بفعل امتصاص الطاقة الضوئية وتحولها إلى حرارية، وعدم تبدد هذه الطاقة نظراً لضعف التوصيلية الحرارية للجلد، وتركز الحرارة بالتالي في الجزء المتعرض. وبدرجة أقل يمكن أن يتمثل التلف في حدوث بعض التفاعلات الكيموضوئية بفعل فوتونات الضوء في بعض الخلايا السطحية محدثة تغييراً محسوساً في الروابط الأيونية والجذور الحرة في هذه الخلايا ومؤدية بالتالي إلى تلفها.

وفي كلتا الحالتين سواء كانت آلية التلف في الخلايا ناتجة عن ارتفاع درجة حرارة الخلايا أو عن تكون جذور حرة بفعل التفاعلات الكيموضوئية، يمكن أن تؤدي

التغيرات الحادثة في الجلد إلى التهابات وحروق واحتمال تغير خصائصه، وتغير معدلات انقسام الخلايا، وبالتالي إلى احتمال موت الخلية أو تحولها إلى خلية سرطانية.

ومنذ أوائل القرن العشرين، تم إجراء العديد من الدراسات حول التأثيرات القاتلة للضوء المرئي على بعض أنواع البكتريا، وعلى شرائح هذا الضوء الأكثر فتكاً بالنسبة لأنواع مختلفة من هذه البكتريا. ولهذا الغرض استخدم الزجاج الملون لتمرير الضوء وحيد اللون لدراسة قدراته على الفتك بأنواع معينة من البكتريا. وقد تمخضت بعض هذه الدراسات عن أنه بالنسبة للبكتريا العصوية والدرنية فإنه يكفي لقتلها تعريضها للضوء الأبيض أو للضوء المرشح وحيد اللون لفترة زمنية محددة. ويبين جدول (٣-١) أزمنة التعرض للضوء الأبيض أو لمركباته التي تحدث التأثير القاتل للبكتريا العصوية.

لون الضوء المؤثر	المدة اللازمة للقضاء على البكتريا (دقيقة)
الضوء الأبيض (غير المرشح)	٥ - ١٠
الضوء الأزرق	١٠ - ٢٠
الضوء الأحمر	٢٠ - ٣٠
الضوء الأخضر	٤٥

جدول (٣-١)

وفي الوقت الحالي لا توجد دراسات كافية للحكم على طبيعة العلاقة بين احتمالات الإصابة بسرطانات الجلد وبين التعرض للضوء المرئي، سواء كان هذا التعرض من النوع الحاد أي (لأشعة ضوئية كثيفة وخلال فترة زمنية قصيرة) أو من النوع المزمن (أي التعرض لأشعة ذات شدة منخفضة ولكن لفترات طويلة). إلا أنه يجب الإشارة إلى أن الدراسات والبحوث قد أثبتت أن الأشعة فوق البنفسجية يمكن أن تؤدي إلى حدوث سرطان الجلد. وحتى الآن لم يتم تحديد شريحة الضوء فوق

البنفسجي المسؤولة عن استحثاث السرطانات في الجلد بالدقة الكافية. ومع ذلك فقد أوضحت الشواهد التجريبية أنه حتى في غياب المواد ذات الحساسية الشديدة للضوء فإن شريحة الأشعة فوق البنفسجية التي تقع أطوال موجاتها بين ٢٩٠، ٣٢٠ نانومتر تعتبر من الشرائح المستحثة للسرطان.

كذلك، أثبتت الدراسات الأحيائية أن التعرض لضوء الشمس الذي يتضمن هذه الشريحة من الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية يساهم بدرجة أكيدة في زيادة احتمال الإصابة بسرطان الجلد بما في ذلك سرطان الميلانوما الذي يعتبر شديد الخطورة ومن السرطانات الخبيثة.

وقد أكدت الدراسات أن معدل الإصابة بسرطانات الجلد يقل كثيراً في المناطق الباردة والمعتدلة المناخ، في حين يتزايد هذا المعدل بالاقتراب من المناطق الحارة. فقد أوضحت هذه الدراسات إلى أن احتمال الإصابة بالسرطانات الجلدية نتيجة التعرض لأشعة الشمس بما فيها الأشعة فوق البنفسجية يتضاعف مرة كلما تم الانتقال نحو خط الاستواء بمقدار ٨ – ١٠ درجات عرض. كذلك ينبغي التنويه إلى أن هناك أنواعاً من الجلد تعتبر أكثر حساسية بالنسبة لاستحثاث السرطانات الجلدية، ومنها الجلد الأبيض الذي يميز سكان المناطق الشمالية.

ومن نتائج التأثيرات البيولوجية الأخرى للأشعة فوق البنفسجية استخدام هذه الأشعة لقتل بعض أنواع البكتريا. وقد أكدت البحوث والدراسات البيولوجية حول التأثيرات القاتلة للأشعة فوق البنفسجية أن شريحة الموجات التي يتراوح طولها بين ٢٥٠، ٢٧٠ نانومتر تعتبر من أكثر الشرائح فتكاً بعدد من أنواع البكتريا كالجراثيم البوغية (Spores) وغيرها.

وتؤثر الحزم الكثيفة من الضوء المرئي، والأشعة البنفسجية تأثيرا سلبيا على كل من العدسة والشبكية في العين البشرية، يمكن أن يصل إلى عتامة عدسة العين أو إلى حدوث تلف في الشبكية قد يؤدي إلى العمى الدائم. ويتمثل التأثير الضار للأشعة فوق البنفسجية وللحزم الكثيفة من الضوء المرئي إلى التسخين الذي تحدثه هذه الأشعة في العين. وسوف يرد الحديث في هذا الخصوص في الفقرات التالية عند تناول تأثيرات الموجات الدقيقة وأشعة الليزر على العين.

٣-٣ التأثيرات البيولوجية للموجات الدقيقة

من المعروف أن الأنسجة والأعضاء البشرية تتكون من خلايا بنائية مغمورة في سوائل بيولوجية. وتتكون الخلايا عامة من جزيئات محددة وثابتة وغالباً ما تكون مستقطبة كهربائياً، بينما تتضمن السوائل البيولوجية أيونات من المناحل (Electrolytes) الذائبة والأيونية الجهرية (الكبيرة الحجم). وتحت تأثير المجالات الكهربائية عالية التردد التي تحملها الموجات الدقيقة عموماً تتأثر هذه الجزيئات القطبية والأيونات بقوى كهربائية يتناسب مقدارها مع كل من شدة المجال الكهربائي E والشحنة q التي يحملها الجزيء القطبي أو الأيون. وتؤدي هذه القوى المؤثرة على الأيونات إلى تحريكها، أي إلى سريان تيار كهربائي داخل النسيج الحي في حالة الأيونات الذائبة الأمر الذي يؤدي إلى تسخين هذا النسيج، وفقاً لقوانين جول للتسخين الكهربائي. وفضلاً عن ذلك فإن المجال الكهربائي المؤدي إلى توليد قوى على الجزيئات القطبية يؤدي إلى تسخين إضافي للأنسجة بفعل الاهتزازات التي تحدثها هذه الجزيئات بسبب ترددات الموجات الدقيقة.

وبالنسبة لجميع أنواع الموجات الدقيقة سواء المستخدمة في الاتصالات بما فيها الهواتف المحمولة (الجوالة) أو تلك المستخدمة للتسخين، فقد اتفق على أن كثيرا من التأثيرات الناتجة عنها هي تأثيرات حرارية وأن معظم تأثيراتها الضارة ترجع للأثر الحراري والتسخين. وعندما لا يرجع التأثير البيولوجي على الخلية أو النسيج أو العضو عموماً إلى التأثير الحراري يوصف هذا التأثير عندئذ بالتأثير غير الحراري.

٣-٣-١ التأثيرات الحرارية للموجات الدقيقة

تحدث التأثيرات الحرارية عموماً عندما يتجاوز التعرض للموجات الدقيقة حوالي ١٠ مللي واط/سم٢ . وقد أثبتت البحوث والدراسات على حيوانات التجارب أن الموجات الدقيقة التي تتراوح تردداتها بين ٢٠٠ إلى ٢٤٠٠٠ ميغاهيرتز تعتبر قاتلة إذا كان حاصل ضرب كل من كثافة التعرض لهذه الأشعة في زمن التعرض كافياً لرفع درجة حرارة النسيج أو العضو فوق درجة حرارة الاتزان مع الأعضاء المحيطة بأكثر

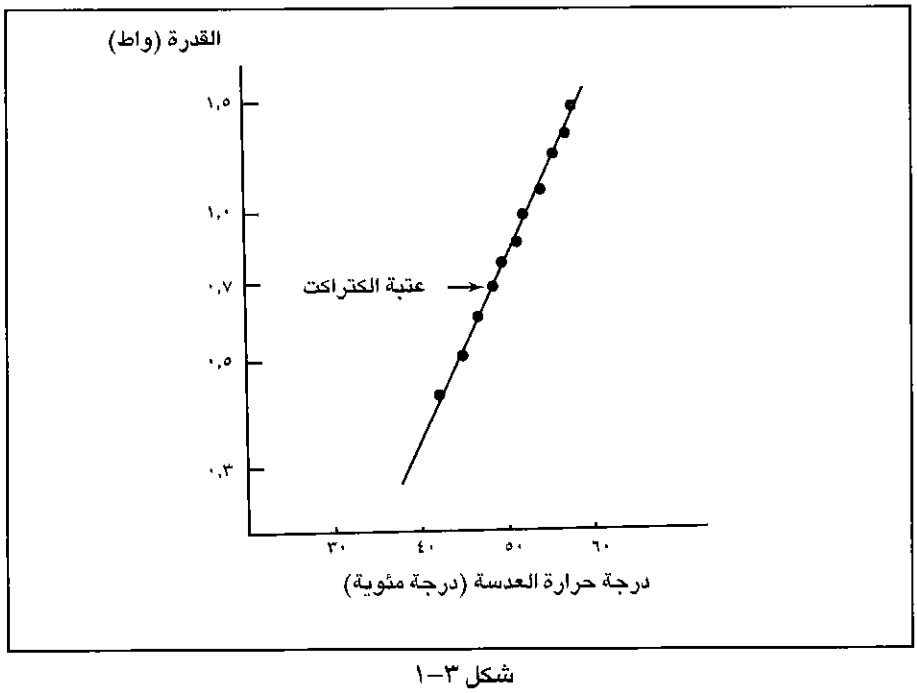
من ٥ درجات مئوية. فعلى سبيل المثال، فإن الفئران التي تعرضت لموجات دقيقة بتردد ٣٠٠٠ ميغاهيرتز، وبكثافة قدرة بلغت ٣٠٠ مللي واط / سم٢ عانت من ارتفاع درجة حرارتها ما بين ٨ إلى ١٠ درجات مئوية، وماتت جميعها بعد ١٥ دقيقة من التعرض. أما عند التعرض لكثافة قدرة مقدارها ١٠٠ مللي واط/ سم٢ فقد ماتت الفئران بعد ٢٥ دقيقة من التعرض بسبب ارتفاع درجة حرارتها بين ٦، ٧ درجات.

ومن المعلوم أن الإنسان الذي لا يزاول جهداً بدنياً كبيراً يولد حرارة من عمليات التمثيل الحيوي بمعدل يبلغ حوالي ٧٥ واط . أما الإنسان الذي يقوم بمجهود عضلي متوسط، فيبلغ تولد الحرارة من التمثيل الحيوي فيه حوالي ٣٠٠ واط. وتتبدد هذه الحرارة في الهواء أو للبيئة المحيطة بالإنسان عندما لا تتجاوز درجة حرارة هذه البيئة ونسبة الرطوبة فيها حدوداً معينة. فإذا تجاوزت درجة حرارة البيئة ونسبة الرطوبة فيها هذه الحدود انخفض معدل تبدد الحرارة وبالتالي ترتفع درجة حرارة جسم الإنسان.

ويبلغ معدل تبدد الحرارة للبيئة المحيطة في الظروف البيئية المريحة من درجة الحرارة ونسبة الرطوبة حوالي ٦٥ – ٧٠ واط . وينبغي أن تخضع كمية الحرارة المتصة في جسم الإنسان من الموجات الدقيقة للتبديد بنفس الأسلوب المذكور. وبعملية حسابية بسيطة وبفرض أن مساحة من جسم الإنسان المعياري (كتلته ٧٠ كيلوغراماً) مقدارها ٠,٩ م٢ تتعرض لحزمة من الموجات الدقيقة بكثافة قدرة مقدارها ١٠ملي واط/سم٢ ، يكون معدل إيداع الطاقة في هذا الشخص هو ٩٠٠٠ سم٢ × ١٠ × ١٠$^{-٣}$ = ٩٠ واط، أي ما يزيد قليلاً على الطاقة المتولدة عن عمليات التمثيل الغذائي في الإنسان الذي لا يزاول جهداً بدنياً. فإذا لم تتوفر الظروف البيئية المواتية لتبديد هذه الحرارة (أي الظروف المريحة)، أو إذا زاد معدل التعرض للموجات عن ١٠ مللي واط/سم٢ لا تتبدد الحرارة وتبدأ درجة حرارة الجسم في الارتفاع.

إن معظم التأثيرات البيولوجية الضارة بالإنسان من الموجات الدقيقة تعزى للسخونة الفائقة التي تترتب عن تعرض أعضاء الجسم البشري لها. ويتضمن ذلك التلف الذي يحدث أساساً للعين والخصيتين من جراء التعرض لقدرات عالية من الموجات الدقيقة. فهذان العضوان البشريان يعتبران من الأعضاء التي يمكن أن تصاب

بفقر الدم نظراً لحدوث انسدادات في تدفق الدم في أوعيتهما. لذلك، يصعب على هذين العضوين تبديد الطاقة الممتصة فيهما إذا تجاوز معدل الامتصاص ١٠ـ ١٥ ملي واط/سم٢ . فعدسة العين أكثر حساسية لارتفاع درجة الحرارة نظراً لوجودها داخل نسيج يعيق تبديد الطاقة وبالتالي، ترتفع درجة حرارتها بسرعة عند سقوط حزم الموجات الدقيقة أو حتى الضوئية أو فوق البنفسجية عليها. ويوضح المنحنى المبين في شكل (٣–١) العلاقة بين مقدار الطاقة الممتصة في عدسة العين البشرية من موجات دقيقة طولها الموجي ٧ سم من مصدر كثافة قدرته ٠,٩ واط/سم٢ ، وتأثيرها على رفع درجة حرارة عدسة العين، كما يبين الشكل الحد الذي تحدث عنده عتامة العدسة (المرض المعروف بالكتراكت أو الماء الأبيض). وتجدر الإشارة إلى أن المخاطر الناجمة عن الموجات الدقيقة في العين تحدث غالباً في السطح الخلفي للكبسولة المغلفة للعدسة شأنها شأن الأضرار التي تحدث عن الإشعاعات المؤينة. أما عتامة عدسة العين الناتجة عن التقدم في العمر فتحدث غالباً في السطح الأمامي للكبسولة المغلفة للعدسة.



شكل ٣–١

ورغم عدم وجود دراسات كافية حول درجة الحرارة التي تبدأ عندها عتامة عدسة العين بفعل الموجات الدقيقة إلا أن معظم العلماء يعتبرون أن زيادة درجة حرارة العدسة إلى ٤٥°م وما فوقها يؤدي إلى إحداث العتامة.

أما بالنسبة للخصيتين فمن المعروف أنهما تتأثران تأثراً شديداً بدرجة الحرارة. ورغم أن درجة حرارة الجسم البشري العادية هي ٣٧°م إلا أن درجة حرارة الخصيتين تقل دائماً درجتين (أي أنها ٣٥°م في الظروف العادية)، وذلك نظراً لوجودهما في كيس خارج الجسم البشري. وزيادة درجة حرارة الخصيتين إلى ٣٧°م يؤدي إلى انخفاض معدل إنتاج الحيوانات المنوية. إلا أن هذا التأثير يعتبر أمر مؤقتاً. فبانخفاض درجة حرارة الخصيتين تعود لهما نفس القدرة السابقة على إنتاج الحيوانات المنوية بصورة عادية. وقد أثبتت البحوث على حيوانات التجارب أنه عند زيادة درجة حرارة الخصيتين عن حد معين تفقد الخصيتين قدرتهما على إنتاج الحيوانات المنوية بصفة دائمة ويستحيل عندئذ العودة للإنتاج مهما خفضت درجة الحرارة.

٣-٣-٢ التأثيرات غير الحرارية للموجات الدقيقة

بالنسبة للتأثيرات غير الحرارية للموجات الدقيقة بشرائحها الفرعية المختلفة فإن هذه التأثيرات ما زالت غير مفهومة بالوضوح اللازم. فقد اكتُشفت العديد من التأثيرات غير الحرارية الضارة سواء على حيوانات التجارب أو على الإنسان. وأثبتت الدراسات والبحوث المختلفة أن التعرض لموجات دقيقة بكثافة قدرة تزيد على ١٠ ملي واط/سم٢ يؤدي إلى عدد من التأثيرات غير الحرارية الضارة. ويورد جدول (٣-٢) بعض النتائج التي توصلت إليها التقارير العلمية حول أهم التأثيرات غير الحرارية لهذه الموجات عند مستوى قدرة تزيد كثافته على ١٠ ملي واط/سم٢ وأعراضها وشواهدها.

م	العرض	الشاهد
١	زيادة معدل الإحساس بالإرهاق	بطء ضربات القلب
٢	صداع مؤقت أو مستمر	ارتفاع ضغط الدم
٣	العصبية الفائقة	فرط نشاط الغدد الدرقية
٤	الميل للنعاس أثناء العمل	ارتفاع مستوى الهستامين في الدم
٥	ضعف حساسية حاسة الشم	

جدول (٣-٢): بعض الأعراض التي تصيب المتعرضين للموجات الدقيقة

وفضلاً عن ذلك، تبين وجود بعض الاضطرابات التي تصيب العاملين بأجهزة الموجات الدقيقة والمتعرضين لحزمها. ومن الأمراض التي تعود أسبابها للتعرض لحزم هذه الموجات الدقيقة الصداع المؤقت والمزمن، والإجهاد البصري المعروف بحسور العين، والإرهاق والدوار (الدوخة)، والنوم القلق (المتقطع)، والميل للنعاس أثناء العمل، والميل للكآبة والانطوائية، وحدّة الطبع والعصبية، والشعور بالخوف والإصابة بوسواس المرض، والتوتر العصبي، والوهن الذهني، وانخفاض القدرة على التركيز، وضعف الذاكرة، والشعور بالألم في فروة الرأس والحواجب، وآلام في العضلات، وآلام في القلب، وصعوبة في التنفس، وتعرق شديد في الأطراف، وصعوبات في الحياة الجنسية.

وحاليا لاتتوفر بيانات كافية للحكم على احتمال استحثاث السرطانات بفعل شرائح الموجات الدقيقة وعلى مقدار هذا الاحتمال. إلا أن بعض الدراسات الأولية على حيوانات التجارب قد بينت أن التعرض لحزم كثيفة من الموجات الدقيقة قد يستحث بعض أنواع السرطانات في هذه الحيوانات، إلا أن هذه الدراسات والبحوث ما زالت في أطوارها الأولى. كذلك، أكدت الدراسات المختبرية على الحيوانات المتعرضة لجرعات عالية نسبياً من الموجات الدقيقة حدوث تغيرات محسوسة في خصائص

الموجات الدماغية، وحدوث تغييرات للحاجز الدموي للمخ blood - brain ban، وحدوث تغييرات جوهرية على النفاذية خلال غشاء الخلية، وحدوث تغييرات في الدم وتأثيرات جينية وتأثيرات ملحوظة على النظام العصبي المركزي وعلى السلوك البشري، عموما.

وتعود الأسباب في عدم القدرة على الحكم بدرجة كبيرة من الثقة على مخاطر الموجات الدقيقة إلى العجز الشديد والنقص الهائل في قياس جرعات التعرض لهذه الموجات، وإلى صعوبة فصل المجموعات البشرية الحرجة المتعرضة لهذا النوع من الأشعة عن المجموعات المرجعية التي لاتتعرض لها، وكذلك إلى استحالة فصل السرطانات المتولدة عن الموجات الدقيقة عن تلك المستحثة من أسباب أخرى. وسوف يستمر هذا الأمر من عدم الجزم بالمخاطر الجسيمة للموجات الدقيقة حتى يتم إيجاد حلول لمشاكل قياس الجرعات من هذه الموجات، وإلى أن يتم الوصول لعلاقة أكيدة بين الجرعة والأعراض بالدقة اللازمة، وإلى صورة استجابة واضحة بين الجرعة وتأثيرها، وبالتالي يمكن تحديد معامل المخاطر من هذه الموجات.

وإلى أن يتم حل جميع هذه المشاكل العلمية والتقنية، ينبغي توخي الحذر واتخاذ موقف أكثر تحفظا من هذه الموجات التي تأكدت مخاطرها على حيوانات التجارب. كما ينبغي اتخاذ مواقف شديدة التحفظ بالنسبة لصغار السن والمراهقين والشباب نظرا لأن الأعراض السرطانية نتيجة التعرض لهذة الموجات لا تظهر على المتعرض إلا بعد مرور فترة طويلة على التعرض قد تصل لعشرات قليلة من السنين.

الفصل الرابع

أشعـة الليـزر

٤-١ نبذة عن أشعة الليزر

اشتقت كلمة ليزر (Laser) بتجميع الحروف الأولى من جملة إنجليزية مكونة من خمس كلمات هي "Light amplification by stimulated emission of radiation"، وتعني تكبير أو تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المستحث (أو المحفز) بالإشعاع. ويطلق مصطلح الليزر على الجهاز الذي يولد حزمة أشعة ضوئية وحيدة اللون (أي وحيدة التردد والطاقة والطول الموجي) وذلك ضمن شريحة الضوء المرئي عادة، فضلاً عن بعض الأجهزة التي تولد حزمة أشعة الليزر ضمن شريحتي الموجات فوق البنفسجية أو تحت الحمراء. وتتميز حزمة أشعة الليزر بين جميع شرائح الموجات الكهرمغنطيسية بأنها تتكون من موجات متطاورة (in phase). ويعني هذا المصطلح أن جميع موجات الحزمة يكون لها نفس الطور في جميع لحظات انتشارها، أي أن جميع الموجات تصل للقمة معا ثم تخبو تدريجيا بالمعدل نفسه حتى تصل للصفر معا، وتستمر في التناقص حتى تصل للقيمة الدنيا (أي القاع) معا، ثم تبدأ في التزايد من جديد حتى تصل الصفر معا، وتستمر في التزايد حتى تصل للقمة من جديد معا، وهكذا.

وعندما تتطاور جميع موجات (أي فوتونات) الحزمة يقال أن حزمة الضوء مترابطة أو متماسكة (Coherent) بالنسبة للفراغ وكذلك بالنسبة للزمن، نظراً لتميز جميع موجات الحزمة بنفس التردد f. ونتيجة لهذا التماسك أو الترابط تتميز حزمة أشعة الليزر بخاصيتين هامتين هما:

أ- زاوية تفرق محدودة للغاية تقترب من الصفر (لمعظم أنواع الليزر باستثناء بعض قليل منها) بحيث تكون جميع موجات الحزمة متوازية تماماً وتكونمساحة مقطع الحزمة عند مخرج جهاز الليزر مساوية لمقطعها على امتداد المسافة التي تقطعها (ربماعدة مئات الكيلومترات) وذلك بخلاف الضوء العادي الذي ينبعث

من المصدر في جميع الاتجاهات. وهناك أنواع من الليزر تنطلق منها حزمة الليزر بزاوية تفرق لا تتجاوز ٢٠ درجة، ومن أهمها بعض ليزرات أشباه الموصلات.

ب ـ تركيز مكثف لطاقة حزمة الليزر بالنسبة لوحدة المساحة من مقطع الحزمة وبقاء هذا التركيز ثابتاً حتى بعد انتقال الحزمة لمسافات كبيرة تصل إلى عشرات بل مئات الكيلومترات، وذلك بخلاف الضوء العادي الذي تقل شدته وبالتالي يقل تركيزه مع زيادة المسافة وفقاً لقانون التربيع العكسي.

ويرجع الفضل في انتشار تقنيات أشعة الليزر في التطبيقات المتعددة لهاتين الخاصيتين، حيث يمكن أن تنتقل حزمة الليزر لمسافات بعيدة دون أن تفقد تركيزها. كذلك، تعود المخاطر الكبيرة لأشعة الليزر لنفس هاتين الخاصيتين.

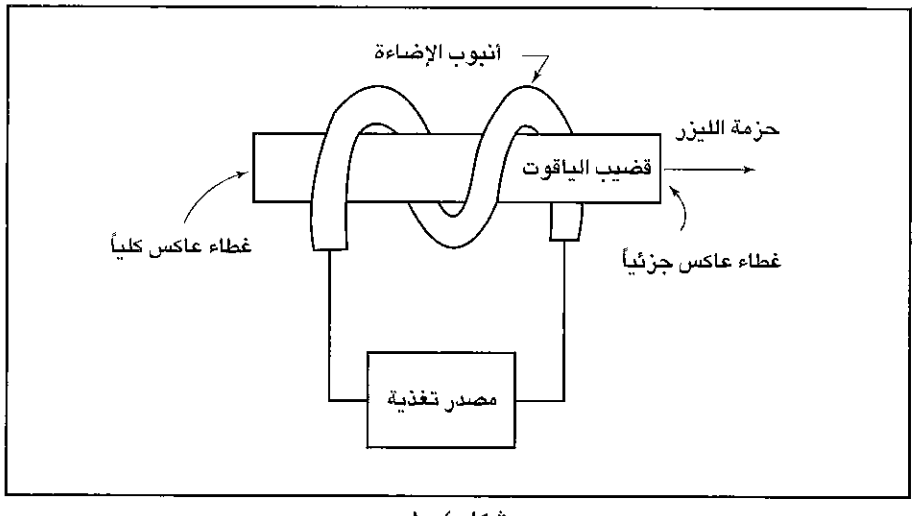
٤ـ٢ جهاز توليد أشعة الليزر وكيفية عمله

يتكون أي جهاز لتوليد آشعة الليزر (شكل ٤ـ١) سواء كان وسط التوليد قضيبا صلبا أو تجويفا يتضمن سائلا أو غازا من ثلاث مركبات رئيسة هي:

أ ـ القضيب (أو التجويف)

وهو قضيب صلب (شكل ٤–١) أو تجويف مملوء بسائل أوغاز معين. ويجب أن تكون مادة القضيب الصلبة أو السائل أو الغاز المستخدم في التجويف ذات معامل نوعية بصرية (كيو) كبير. ويوجد على أحد طرفي القضيب أو التجويف مرآة عاكسة بنسبة كاملة (أي ١٠٠٪)، في حين يوجد على الطرف الآخر مرآة عاكسة جزئياً (أي بنسبة تقل عن ٩٠ ٪ عادة)، ويكون هذا الطرف هو مخرج حزمة الليزر. ولإيضاح معنى معامل النوعية البصري Q في حالة الليزر فإن هذا المعامل لا يختلف عن المفهوم الفيزيائي للمعامل المستخدم في دوائر التيار المتردد والدوائر الإلكترونية رغم اختلاف التطبيق. فالدارة الإلكترونية ذات معامل النوعية الكبير تتميز بقدرتها على الاستجابة للموجات في مدى ضيق للغاية من الترددات، مما يمكّن من التقاط ترددات محطة دون أخرى، بينما الدارة ذات المعامل الصغير تستجيب لمدى عريض من الترددات الأمر الذي يجعل فصل محطات الإرسال عن بعضها البعض أمراً بالغ

الصعوبة. أما في نظم الليزر والنظم الميكانيكية الأخرى فإن مفهوم معامل النوعية Q فهو عبارة عن نسبة الطاقة المخزنة في النظام إلى الطاقة المتبددة في وحدة الزمن، أي إلى القدرة المتبددة.



شكل ٤-١

ب - وسط الليزرة

وسط الليزرة هو عبارة عن المادة التي يمكن إثارتها إلى حالة تكون فيها ذراتها شبه مستقرة (Metastable) من خلال تغذيتها بكميات من الطاقة بصورة منتظمة. وتعرف عملية التغذية هذه بمصطلح ضخ الطاقة إلى وسط الليزرة. ويقصد بالحالة المثارة شبه المستقرة حالة الذرات المثارة التي تستمر إثارتها مدة طويلة نسبياً من الزمن.

وقد يكون وسط الليزرة مادة صلبة مثل قضيب الياقوت (Ruby) أو مادة شبه موصلة أو غيرها من أوساط الليزرة الصلبة المختلفة، ويوصف جهاز الليزر عندئذ بالصلب. كذلك، يمكن أن تكون مادة الليزرة سائلة ويوسم جهاز الليزر، عندئذ، بالليزر السائل. وأخيراً، يوجد العديد من أوساط الليزرة الغازية مثل ليزر الهليوم - نيون، والزينون - نيتروجين، والأرجون - كربتون، وثاني أكسيد الكربون، وغيرها.

ج ـ مضخة الطاقة

هي الوسيلة التي تضخ الطاقة في وسط الليزرة. ومصدر الطاقة اللازم لإثارة ذرات وسط الليزرة قد يكون مصدراً للضوء الكثيف الذي تنبعث منه الموجات الضوئية ضمن مدى عريض من الطاقات (الترددات)، وتتضمن بالضرورة الفوتونات ذات الترددات المحددة التي تثير ذرات الوسط (لاحظ أن كل مادة تحتاج إلى ضوء بترددات محددة القيمة دون غيرها لإحداث الإثارة). وبالنسبة لليزر الغازي تستخدم الترددات الراديوية، التي يتم توليدها بواسطة مولد نبضات جهدية بجهد يبلغ حوالي ١٠٠٠ فولط، حيث تقوم هذه النبضات الجهدية بتسريع أيونات تقوم عند تصادمها مع ذرات وسط الليزرة بتأيين هذه الذرات. أما أجهزة الليزر التي تستخدم مادة شبه موصلة (ثنائي شبه موصل) كمادة الليزرة مثل زرنيخات الغاليوم Gallium arsenide ، فيتم ضخ الطاقة إليها بتمرير تيار كهربائي شديد الكثافة (ما بين عدة مئات وعدة آلاف الأمبير لكل سم٢) عبر الملتقى الثقبي الإلكتروني لمادة شبه الموصل (أو الثنائي).

وهكذا، فإنه يمكن ضخ الطاقة لوسط الليزرة وإثارة ذراته بعدة طرائق هي:

١ـ إسقاط ضوء مرئي بشريحة ترددات عريضة على وسط الليزرة حيث تمتص ذرات هذا الوسط فوتونات الضوء ذات التردد المحدد الملائم للإثارة، دون غيرها.

٢ـ إسقاط تيار من الجسيمات المشحونة عالية الطاقة نسبياً على المادة وامتصاص ذرات مادة الليزرة لطاقة الجسيمات مما يؤدي للإثارة.

٣ـ تسخين وسط الليزرة حيث تكتسب ذرات الوسط طاقة حرارية تؤدي إلى إثارة هذه الذرات.

٤ـ تمرير تيار كهربائي كثيف وتصادم حاملات الشحنة (الإلكترونات والثقوب) مع ذرات الوسط مما يؤدي إلى إثارتها.

٥ـ إحداث تفاعلات كيميائية باعثة للطاقة مثلما يحدث في حالة اللهب.

وبإثارة عدد كبير من ذرات الوسط وانتقال أحد إلكترونات كل ذرة إلى مدار أبعد عن النواة (وهذا هو تعريف الإثارة) من خلال ضخ الطاقة المستمر لهذه الذرات بالطرائق المختلفة، ومع اختيار مواد الليزرة المناسبة ذات الصفة شبه المستقرة في الحالة المثارة تبقى هذه الذرات في الحالة المثارة لفترة زمنية طويلة نسبياً. وهكذا، يبقى عدد كبير من ذرات وسط الليزرة في الحالة المثارة إلى أن يحفز أحد الفوتونات المارة ذو الطاقة المحددة انتقال الإلكترونات في الذرات المثارة للمستوى الطاقي الأدنى بحيث يكون هذا الانتقال متزامنا مع بعضه البعض. وبالتالي، ينبعث عن انتقال هذه الإلكترونات من المستوى الأعلى للمستوى الأدنى انطلاق عدد هائل من الفوتونات (يساوي عدد الذرات التي تفقد إثارتها) في نفس اللحظة وبنفس الطاقة (التردد). وقد أثبت أينشتين أن أي فوتون تكون طاقته مساوية تماماً لطاقة الإلكترون في الحالة المثارة يمكنه أن يحفز الإلكترون المثار للسقوط لمستوى الطاقة الأدنى وانبعاث فوتون طاقته مساوية لطاقة الإثارة. وهكذا يكون لكل من الفوتون المحفز والفوتون المنبعث نفس التردد (الطاقة) كما يكون لهما نفس الطور.

٤-٣ فعل الليزرة

يقصد بفعل الليزرة آلية انبعاث حزمة متماسكة ومتطاورة من أشعة الليزر تتميز جميع فوتوناتها بنفس الطاقة (التردد). فبعد إثارة عدد هائل من ذرات وسط الليزرة بفعل ضخ الطاقة لهذا الوسط يمكن أن تعود إحدى الذرات لحالتها المستقرة مصدرة فوتوناً بالطاقة المحددة المساوية لفرق طاقة الإلكترون في المستويين. ويمكن لهذا الفوتون أن يحفز ذرة أخرى للتخلص من إثارتها وإصدار فوتون آخر بنفس التردد والطور، كما يمكن أن يخترق هذا الفوتون الأول جدار القضيب أو التجويف ويفقد خارجه. أما الفوتونات التي تنبعث في اتجاه مواز للمحور الطويل للقضيب أو التجويف فيستمر في تحفيز الذرات التي يقترب منها على طول مساره، وكلما حفز ذرة يصبح الفوتون إثنان وينتشران معا بنفس الطاقة والاتجاه والطور، ومع مرور الفوتونان في نفس الاتجاه يحفزان ذرتين أخريتين فينطلق فوتونان جديدان بنفس التردد والطور والاتجاه، وتصبح المحصلة أربعة فوتونات متطاورة.

وهكذا، يتبين أنه كلما تقدمت حزمة الفوتونات في اتجاه محور القضيب أو التجويف يتضاعف عدد الفوتونات فيها (أي تزداد كثافة الفوتونات)، وتبقى هذه الفوتونات متماسكة ولها نفس الطاقة والاتجاه والطور إلى أن تصل الحزمة إلى المرآة الموجودة عند المقطع الطرفي للقضيب أو التجويف. فإذا كانت هذه المرآة من النوع كامل الانعكاس فإنها تعكس حزمة الفوتونات المتطاورة بزاوية ١٨٠° أي في اتجاه مواز لمحور التجويف. ومع مرور الفوتونات في الاتجاه الجديد فإنها تحفز ذرات جديدة على إطلاق فوتوناتها بنفس الطور والتردد وفي نفس الاتجاه، فتتضاعف كثافة الفوتونات أكثر وأكثر، إلى أن تصل حزمة الفوتونات المتماسكة إلى المرآة محدودة الانعكاسية، فيخرج جزء من فوتونات الحزمة خارج القضيب أو التجويف في صورة حزمة الليزر التي نعرفها، وينعكس الجزء الآخر بمقدار ١٨٠° (أي يرتد للخلف) ليقوم بتحفيز ذرات مثارة جديدة يكون قد تم ضخ الطاقة إليها وإثارتها ...، وهكذا.

ويستمر فعل الليزرة طالما استمر ضخ الطاقة إلى وسط الليزرة. ويتوقف الطول الموجي لحزمة الليزر المنبعثة على نوع مادة الليزرة . فمثلاً، يُوَلّد ليزر الياقوت ضوءا مرئياً بطول موجي مقداره ٦٩٤ نانومتر. أما ليزر الهليوم والنيون الغازي فيولد حزمة ليزر بطول موجي مقداره ٦٣٣ نانومتر. ويبين جدول (٤-١) الأطوال الموجية لحزم الليزر المتولدة من مواد الليزرة المختلفة، وذلك من شرائح الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية.

وسط الليزرة	الطول الموجي (نانومتر)	وسط الليزرة	الطول الموجي
الياقوت ($AL_2O_3 + G$)	٦٩٤	ثاني أكسيد الكربون	١٠٦٠
هليوم – نيومن	٦٣٣	غاليوم - زرنيخ	٩٠٠
زينون – فلومر	٣٥١	غاليوم- أنتيمون	١٥٠٠
أرجون – فلور	١٩٣	رصاص- كبريت	٤٣٠٠

جدول ٤-١

٤-٤ الليزر المستمر والليزر النبضي

تعمل أجهزة الليزر المختلفة وفق أحد الأنماط الثلاثة التالية:

٤-٤-١ أجهزة الحزمة المستمرة

عندما تسمح المرآة ذات الانعكاس الجزئي الموجودة عند أحد طرفي التجويف البصري بانتقال جزء من حزمة الفوتونات للخارج وانعكاس الجزء الآخر للداخل، وعند توفر إمكانية ضخ الطاقة بصفة مستمرة لوسط الليزرة بحيث يمكن المحافظة على كثافة الحزمة المنبعثة من الجهاز ثابتة يوصف هذا الجهاز عندئذ بجهاز توليد حزمة الموجة المستمرة (Continuous wave cw) وتستخدم غالبية أجهزة الحزمة المستمرة الغاز كوسط ليزرة، مع وجود عدد من أجهزة الحزمة المستمرة التي تستخدم وسطاً صلباً. وقد عمل أول جهاز ليزر بحزمة مستمرة باستخدام غازي الهليوم والنيون، حيث يتم إثارة ذرات الهليوم بواسطة جهود عالية متغيرة بترددات راديوية (rf) وتقوم ذرات الهليوم المثارة بدورها بإثارة ذرات النيون إلى الحالة شبه المستقرة عند تصادمهما معاً.

وحالياً يتم إنتاج عدد من أجهزة الليزر ذات الحزمة المستمرة بقدرات متفاوتة، حيث يمكن إنتاج أجهزة ليزر من نوع الهليوم – نيون، بقدرات تتراوح قدرتها بين أقل من ملي واط وحتى حوالي ٥٠ ملي واط. ويمكن إنتاج أجهزة ليزر مستمرة الحزمة بقدرات أعلى حيث يتم حالياً إنتاج أجهزة ليزر ثاني أكسيد الكربون، بحزمة مستمرة، تصل قدرتها إلى ما يزيد على ١٠ كيلو واط.

٤-٤-٢ أجهزة الحزمة النبضية

يمكن حالياً إنتاج عدد من أجهزة الليزر التي تطلق حزمها في صورة نبضات، تمتد النبضة الواحدة لفترة زمنية تتراوح بين أقل من ٠,١ ملي ثانية وحتى عشرات قليلة من الملي ثانية. ويمثل ليزر الياقوت أحد الأمثلة على أجهزة الليزر النبضية. ويتم ذلك في هذا الجهاز بضخ الطاقة من خلال إصدار ومضة (نبضة) كثيفة محددة الزمن من الضوء عند تفريغ مكثف كهربائي عالي السعة خلال انبوب الومض. وتتراوح

طاقة النبضة الواحدة من ليزر الياقوت بين أقل من جول واحد وحتى حوالي ٣٠ جول، بينما يتراوح معدل تكرار هذه النبضات في الأجهزة المختلفة بين حوالي نبضة واحدة كل ٣٠ ثانية حتى ١٠ نبضات في الثانية.

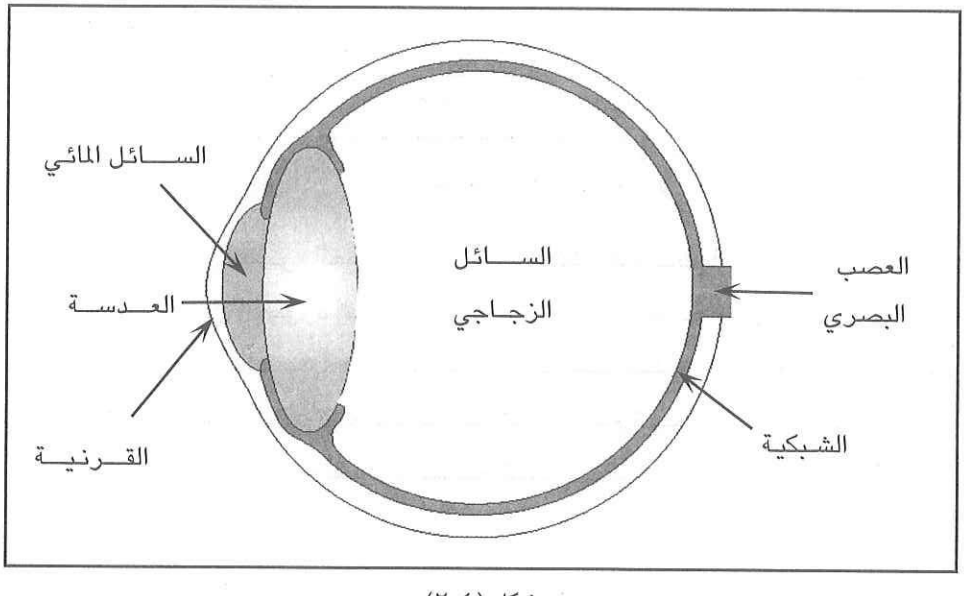
٤-٤-٣ أجهزة نبضية ذات الإغلاق النوعي

هناك بعض أجهزة الليزر النبضية التي تعطي نبضات لفترة زمنية قصيرة للغاية رغم ارتفاع طاقة النبضة بشكل هائل. وفي هذا النوع من الأجهزة يستخدم جهاز سمعي بصري أو كهربائي بصري، موجود داخل التجويف الضوئي للقيام بدور الغالق (البوابة) لإغلاق حزمة الأشعة. ويمكن أن يصل زمن نبضة الليزر في هذه الأجهزة إلى حوالي ١ نانو ثانية في حين يمكن أن تصل قدرتها إلى حوالي ١ ميغاواط.

٤- ٥ التأثيرات البيولوجية لأشعة الليزر ومخاطرها

من واقع التجارب العملية تبين أن لأشعة الليزر تأثيرات شديدة الضرر على كل من العين والجلد. فهذه الأشعة تؤدي إلى تلف بعض الخلايا والأنسجة في هذين العضوين. ويحدث التلف في هذين العضوين إما نتيجة لارتفاع درجة حرارة الخلايا المتعرضة لأشعة الليزر بسبب امتصاص طاقة هذه الأشعة في تلك الخلايا، أو نتيجة لحدوث تفاعلات كيميائية في هذه الخلايا بفعل الضوء الساقط عليها. ويعتمد النمط الرئيس للتلف على طول موجة أشعة الليزر، وكذلك على نوع النسيج المتعرض. ولأغراض الوقاية من مخاطر الليزر يعتبر النمط الرئيس للتلف هو ذلك الناتج عن التأثيرات الحرارية وارتفاع درجة حرارة الخلايا بالنسبة للأعضاء التي يقع فيها التلف، وهي العين ثم الجلد. ولفهم آلية التأثيرات الواقعة على العين ينبغي التعرف على بنية هذا العضو الهام.

ويبين شكل (٤-٢) بنية العين وأهم النظم البصرية فيها، وهي النظم التي تقوم مجتمعة بتركيز حزمة الضوء الساقط على العين وتكوين صور حقيقية للأجسام على الشبكية. وتتضمن هذه النظم القرنية وهي الطبقة الشفافة التي تقع تحت غشاء العين مباشرة، والسائل المائي المكون من محلول مخفف من الماء النقي الشفاف إلى جانب الزلال والبروتين (الجلوبولين) والسكر، والعدسة التي تتكون من نسيج شفاف شبه صلب موجود داخل غشاء يسمى المحفظة التي تقوم بتركيز الصورة على الشبكية دائماً من خلال عملية التكيف accommodation، والسائل الزجاجي الذي يملأ فراغ العين بين العدسة والشبكية.



شكل (٤-٢)

وعندما يقع الضوء المنعكس من جسم ما على العين تركزه النظم البصرية المختلفة للعين السليمة وهي القرنية والسائل المائي والزجاجي، وتكيفه العدسة، بحيث تتكون للجسم صورة حقيقية على الشبكية بكثافة ضوئية تزيد كثيراً على كثافة الضوء عند سقوطه على القرنية بسبب تجميع الأشعة في صورة صغيرة للغاية. فالضوء يدخل العين من خلال الحدقة التي تتسع أو تضيق تبعاً لشدة الضوء وعمر الشخص. ويبين جدول (٤-٢) قيم قطر الحدقة ليلاً ونهاراً ووفقاً لعمر الشخص .

العمر (سنة)	القطر (مم)		الفرق (مم)
	نهاراً	ليلاً	
٢٠	٤,٧	٨,٠	٣,٣
٣٠	٤,٣	٧,٠	٢,٧
٤٠	٣,٩	٦,٠	٢,١
٥٠	٣,٥	٥,٠	١,٥
٦٠	٣,١	٤,١	١,٠
٧٠	٢,٧	٣,٢	٠,٥
٨٠	٢,٣	٢,٥	٠,٢

جدول (٤-٢): قطر حدقة العين نهاراً وليلاً

وبعد دخول الضوء العين تكيف العدسة تكورها، بحيث تركز الصورة على الشبكية التي تحوّل الصورة إلى نبضات عصبية ينقلها عصب العين البصري إلى المخ لترجمة الصورة. والشبكية هي بنية شديدة التعقيد تتشكل من بقعة صفراء تميل للبرتقالي مرتفعة قليلاً يبلغ قطرها حوالي ٠,٦ مم تسمى البقعة macula lutea موجودة في مركز منطقة مقعرة السطح تسمى حفرة (نقرة) الشبكية المركزية fovea centralis.

ويوجد في الشبكية نوعان من المستقبلات الضوئية هما القضبان والمخاريط. والمخاريط مركزة في منطقة الحفرة وهي مسؤولة عن تفريق التفاصيل الدقيقة للصورة والتمييز بين درجات اللون على الرغم من أن هذه المخاريط ضعيفة الحساسية نسبياً وتؤدي مهمتها تحت ظروف الإضاءة الجيدة. أما القضبان فهي شديدة الحساسية بالنسبة للضوء وبالتالي فإن أهميتها تكمن عند الإضاءة الخافتة وعند الرؤية الليلية. إلا أن القضبان غير قادرة على تمييز التفاصيل الدقيقة للصورة أو درجات اللون.

لذلك، فإنه عند مستويات الإضاءة المنخفضة تبدو الأجسام غير واضحة (مشوشة، ويغلب عليها اللون الرمادي. وفي ظهر الشبكية توجد طبقة من نسيج شديد الغني بالأوعية الدموية يطلق عليه اسم المشيمية (أو طبقة العين الوعائية) choroid وتمثل هذه الطبقة مصدر التغذية للشبكية ومنطقة تبادل نفايات التمثيل الغذائي لخلايا الشبكية. فالشبكية في حد ذاتها لا تمثل أوعية دموية. والطاقة الحرارية التي تمتص في الشبكية يجب أن تنقل إلى طبقة المشيمية الغنية بالأوعية الدموية حتى تتبدد هذه الطاقة وتزال من خلال سريان الدم.

٤-٥-١ تأثيرات أشعة الليزر على العين

قد يسبب تعريض العين لحزمة من أشعة الليزر تلفاً للقرنية أو العدسة أو الشبكية تبعاً لطول موجة الضوء الساقط وخصائص امتصاص الطاقة في النسيج المحدد. وقد تبين من الدراسات العملية أن الضوء المرئي عند انتقاله عبر أنسجة العين ينتقل بنسبة كبيرة للغاية خلال القرنية ولا تمتص فيها إلا بنسبة ضئيلة للغاية، بخلاف الأشعة تحت الحمراء البعيدة (أي التي يزيد طولها الموجي على حوالي ٩٢٥ نانومتر التي تمتص منها نسبة محسوسة في القرنية. وكذلك تبين أن الضوء المرئي يمتص بنسبة عالية في الشبكية. وبسبب هذه الخصائص الانتقالية والامتصاصية فإنه يمكن الوصول إلى خلاصة مفادها أن الضوء المرئي محدود التأثير للغاية على القرنية بالمقارنة بالتأثير الذي يمكن أن يحدثه في الشبكية بسبب امتصاص طاقة الضوء فيها. وقد أوضحت التجارب العملية على بعض أنواع القرود (قريبة الخصائص البصرية من الإنسان) أن تعريض العين لأشعة ليزر مرئي بمستوى تدفق قُدرة يبلغ ٣,١ مللي واط/ سم٢، على الشبكية بواقع ثلاث ساعات في اليوم ولمدة ٧ أيام، يؤدي إلى إحداث حروق خطيرة في الشبكية تؤدي إلى العمى. وبالنسبة للإنسان فإن مقدار التلف والمدة الزمنية اللازمة لوقوع الضرر يعتمدان على المساحة المتعرضة، ومعدل التعرض، ومقدار التعرض الإجمالي. والعامل الرئيس في حدوث تلف الشبكية (الذي يصل لدرجة العمى) هو معدل تخلص الشبكية من الطاقة الحرارية ومعدل التبادل الحراري مع منطقة الأوعية الدموية الموجودة خلفها. فارتفاع درجة حرارة الشبكية

لدرجات معدودة فوق درجة حرارة الإنسان المصاب بحمى (أي فوق ٤٠ْم) يمكن أن يؤدي إلى إحداث تلف دائم في الشبكية. ويبين جدول (٤-٣) القيم العتبية (أي التي لا يجوز تجاوزها) بالنسبة لتلف الشبكية المؤدي للعمى من حزم الضوء المرئي.

٤-٥-٢ تأثيرات أشعة الليزر على الجلد

إن تعرض الجلد لحزمة عالية الطاقة من أشعة الليزر خلال فترة زمنية قصيرة قد يؤدي إلى إحداث حروق في الجلد تشبه الحروق الناتجة عن التعرض لحرارة عالية أو لأشعة الشمس. فالجلد البشري الذي يتعرض لجرعات حرارية تزيد على حد معين يصاب بالموت التخثري، الذي تتوقف عواقبه على مدى التعرض. فعند سقوط أشعة الليزر على الجلد تمتص طاقتها فيه وتتحول هذه الطاقة إلى طاقة حرارية يصعب أن تتبدد بسبب التوصيلية الحرارية الرديئة للجلد. ويؤدي الارتفاع الموضعي لدرجة الحرارة إلى فقد بروتين الجلد لخصائصه وإلى تبخر الماء الموجود في النسيج. ويمكن عند زيادة حرارة الجلد حدوث توهج أو تفحم فيه. وتزداد استجابة الجلد لأشعة الليزر بزيادة درجة الخضاب (أي الصبغ أو التلون). فضلاً عن ذلك، تعتمد درجة الضرر الواقعة على الجلد من حزمة الليزر على طول موجة الأشعة وعلى مدة التعرض. ويبين جدول (٤-٤) قيم الحد الأدنى لتدفق حزمة أشعة الليزر على سطح ذراع شخص بالغ من العرق الأبيض (الذي تقل درجة سماره عن الإنسان العربي) التي تسبب تلف الجلد في ظروف مختلفة للتعرض.

نوع الليزر	الطول الموجي (نانومتر)	امتداد النبضة	مستوى العتبة
موجة مستمرة	الضوء الأبيض	—	٦ واط/ سم٢
نبضي	٦٩٤	٢٠٠ ميكروثانية	٠,٨٥ جول / سم٢
نبضي Q	٦٩٤	٣٠ نانوثانية	٠,٠٧ جول/سم٢

جدول (٤-٣) المستوى العتبي لحدوث تلف الشبكية

أما بالنسبة لاستحثاث أشعة الليزر لسرطان الجلد فإنه حتى الآن لا توجد شواهد كافية على العلاقة بين التعرض لحزمة الليزر سواء لجرعات ذات مستوى منخفض بطريقة مزمنة أو لجرعات حادة (أي لحزمة عالية الطاقة خلال فترة زمنية قصيرة) وبين الإصابة بسرطان الجلد. وعلى الرغم من ذلك، فإنه ينبغي الإشارة إلى أنه قد ورد في الفصول السابقة أن الأشعة فوق البنفسجية بما فيها أشعة الليزر التي تقع في مدى الأطوال الموجية من ٢٩٠ نانومتر حتى ٣٢٠ نانومتر هي من الإشعاعات المسرطنة.

٤-٦ معايير الوقاية من مخاطر أشعة الليزر

ينبغي الإشارة إلى أنه لا يوجد حتى الآن في أية دولة عربية قواعد وطنية تنظم تداول أجهزة الليزر وحزمه المختلفة، كما لا توجد أية مؤسسات أو إدارات وطنية تعنى بمراقبة استيراد هذه الأجهزة وتداول حزمها، بينما توجد في معظم دول العالم المتقدم نظم ومعايير لهذا التداول، ومؤسسات وطنية تشرف على مراقبة الالتزام بهذه المعايير. ففي الولايات المتحدة الأمريكية على سبيل المثال تتحمل وكالتان وطنيتان هذه

نوع الليزر	الطول الموجي (نانومتر)	مدة التعرض	مساحة التعرض مم٢	الحد الأدنى جول/سم٢
ياقوت نبضي	٦٩٤	٠,٢ مللي ثانية	٠,٢٤ – ٠,٣٤	١٤–٢٠
أرغون	٥٠٠	٦ ثانية	٩,٥	١٣–١٧
ثاني أكسيد كربون	١٠٦٠	٤–٦ ثانية	١٠٠	٤ – ٦
ياقوت نبضي Q	٦٩٤	١٠–١٢ نانو ثانية	٣٣ – ١٠٠	٠,٥ – ١,٥

جدول (٤-٤): القيم العتبية لتلف الجلد للعرق الأبيض تحت ظروف تعرض مختلفة لأشعة الليزر

الطول الموجي λ(ميكرومتر)	مدة التعرض t (ثانية)	الحد الأقصى المسموح به
٠,٤٠ – ٠,٧٠	$١٠^{-٩}$ – $١,٨ \times ١٠^{-٥}$	٥×١٠^{-٧} جول/سم٢
٠,٤٠٠ – ٠,٧٠٠	$١,٨ \times ١٠^{-٥}$ – ١٠	$١,٨ \times ١٠^{-٣} \times (t^{3/4})$ جول/سم٢
٠,٤٠٠ – ٠,٥٥٠	١٠ – $١٠^{٤}$	١×١٠^{-٢} جول/سم٢
٠,٥٥٠ – ٠,٧٠٠	١٠ حتى T	$١,٨ \times ١٠^{-٣} (t^{3/4})$ جول/سم٢
٠,٥٥٠ – ٠,٧٠٠	T حتى $١٠^{٤}$	١×١٠^{-٢} C جول/سم٢
٠,٤٠٠ – ٠,٧٠٠	$١٠^{٤}$ حتى ٣×١٠^{٤}	١×١٠^{-٦} C واط/سم٢

جدول (٤–٥): حدود تعرض العين لحزمة الليزر المباشرة

المسؤولية، وهما مكتب الصحة الإشعاعية BRH التابع لإدارة الخدمات البشرية والصحية، وإدارة الصحة والأمان المهني OSHA التابع لوزارة العمل (DOL).

وقد اعتمدت هذه الهيئات معايير وطنية أمريكية للتعرض لأشعة الليزر وحزمه كما اعتمدت حدوداً لتعرض كل من العين والجلد لهذه الحزم لا يجوز تجاوزها درءاً للمخاطر الشديدة. واعتماداً على المخاطر التي تحدث لكل من الشبكية والعدسة البللورية للعين قام المؤتمر الأمريكي لعلماء الصحة الحكومي (ACGIH) والمعهد الوطني للمعايير (ANSI) بتحديد الحدود القصوى المسموح بها لكل من التعرض لحزمة أشعة الليزر المباشرة أو للأشعة المتشتتة من هذه الحزمة. ويبين جدول (٤–٥) الحدود القصوى المسموح بها عند تعرض العين لحزمة ليزر مباشرة بينما يعرض جدول (٤–٦) الحدود القصوى للتعرض لضوء ليزري متشتت أو منعكس من الحزمة المباشرة.

الطول الموجي λ(ميكرومتر)	مدة التعرض t (ثانية)	الحد الأقصى المسموح
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{-4} – ١٠	١٠٠,٥٦($t^{1/4}$) جول/سم٢
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{1} – ١٠	١ جول/سم٢
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{3} – ٣ × 10^{4}	١٠($t^{1/4}$) جول/سم٢ ستراديان
٠,٤٠٠ – ٠,٧٠٠	10^{-9} – ١٠	٢١ جول/سم٢ستراديان
٠,٤٠٠ – ٠,٥٥٠	10^{4} – ١٠	٣,٨٣ × ($t^{3/4}$)
٠,٥٥٠ – ٠,٧٠٠	T – ١٠	جول/سم٢ستراديان
٠,٥٥٠ – ٠,٧٠٠	10^{4} – T	٢,١ × C جول/ سم٢ ستراديان

جدول (٤–٦) حدود تعرض العين لحزمة اليزر المتشتتة أو المنعكسة.

ملاحظة: في الجدولين السابقين فإن:

C = 1 للأطوال الموجية من ٤٠٠ حتى ٧٠٠ نانومتر،

$C = 10^{[15(-0.55)]}$ للأطوال الموجية من ٠,٥٥ حتى ٠,٧٠ ميكرومتر،

$T = 10x\ 10^{[20\ (-0.55)]}$ ثانية بالنسبة للطول الموجي من ٠,٥٥ حتى ٠,٧٠ ميكرومتر.

كذلك، يبين جدول (٤–٧) الحدود القصوى المسموح بها في الولايات المتحدة الأمريكية لتعرض الجلد لحزم الليزر.

وتجدر الإشارة إلى أن حجم الصورة على الشبكية يتناسب عكسياً مع قطر الحدقة، وبذلك فإن درجة تركيز الضوء على الشبكية تزيد بزيادة قطر الحدقة. ولهذا السبب ينبغي القول أن القيم الواردة في جدول (٤–٥) للضوء المباشر تقوم على أساس أكبر قطر للحدقة، أي ٧ مم، وهذه نظرة أكثر تحفظا من وجه نظر وقاية العين من المخاطر

الطول الموجي λ(ميكرومتر)	مدة التعرض t (ثانية)	الحد الأقصى المسموح
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{-9} – 10^{0}	٠,٥٦× ($t^{1/4}$) جول/سم٢
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{0} _ 10^{3}	١ جول/سم٢
٠,٣١٥ – ٠,٤٠٠	10^{-3} – ٣× 10^{4}	٠,٠٠١ واط/سم٢
٠,٤٠ – ١,٤٠	10^{-9} _ 10^{-7}	٠,٠٢ جول/سم٢
٠,٤٠ – ١,٤٠	10^{-7} _ 10^{0}	١,١× ($t^{1/4}$) جول/سم٢
٠,٤٠ – ١,٤٠	10^{0} – ٣× 10^{4}	٠,٢ واط/سم٢
١,٤ – ١٠٠٠	10^{-9} _ 10^{-7}	٠,٠٢ جول/سم٢
١,٤ – ١٠٠٠	10^{-7} – 10^{0}	٠,٥٦× ($t^{1/4}$) جول/سم٢
١,٤ – ١٠٠٠	أكثر من ١٠	٠,١ واط/سم٢

جدول (٤–٧): الحدود القصوى المسموح بها لتعرض الجلد لحزم الليزر

٤–٧ متطلبات الوقاية من مخاطر الليزر في الولايات المتحدة الأمريكية

في الولايات المتحدة يتولى مكتب الصحة الإشعاعية (BRH) مسؤولية مراقبة مصنعي أجهزة الليزر (وليس مستخدميها)، من خلال إصدار المواصفات الفنية للأجهزة ومتابعة التحقق منها. ولهذا الغرض تصنف جميع أجهزة الليزر ضمن أربع درجات، تبعاً لمستوى المخاطر للجهاز. وأجهزة الدرجة الأولى هي أقل الأجهزة خطرا، في حين أن أجهزة الدرجة الرابعة هي أكبرها خطراً. ويبين جدول (٤–٨) درجات المخاطر والقدرة المخصصة لكل درجة.

ووفقاً لدرجات مخاطر الليزر يقوم المصنعون بالامتثال لمتطلبات هندسية وأخرى توسيمية (أي ضرورة وضع علامات وتوسيم على الجهاز يحدد درجة الخطورة). وتتضمن المتطلبات الهندسية ما يلي:

- توفير هيكل واقي يمنع التعرض لأشعة الليزر غير اللازمة لأداء المهمة المقصودة (أي للإشعاعات المتسربة).
- توفير أقفال أمان تمنع اقتراب البشر من حزمة الليزر عند انفتاح الهيكل الواقي أو إزاحته.
- وحدة تحكم إضافية متنقلة تسمح بتوفير أقفال إضافية حول المصدر.
- توفير مراقبة تامة على المفتاح لمنع الأشخاص غير المصرح لهم من الاقتراب من جهاز الليزر. ويجب أن يخضع المفتاح للتأمين الكامل والإخفاء وأن يكون جهاز الليزر من النوع الذي لا يمكن تشغيله ما لم يوضع المفتاح في الجهاز ويدار على وضع التشغيل.

الدرجة	نوع الأجهزة
الأولى – I	أجهزة تنتج حزمة ليزر دون حدود المخاطر.
الثانية – II	أجهزة تصدر حزمة ليزر يؤدي التعرض لفترة طويلة لها إلى إحداث تلف للعين. أما التعرض لفترة قصيرة (أقل من ربع ثانية) فلا يؤدي إلى تلف العين
الثالثة – III	أجهزة تصدر حزمة يمكن أن تؤدي إلى تلف العين عند سقوطها عليها لفترة قصيرة.
الرابعة – IV	أجهزة تصدر حزمة ليزر يمكن أن تتلف الجلد وكذلك العين عند وقوعها لفترة قصيرة على أي منهما أو عند التعرض للأشعة المتشتتة عن الحزمة المباشرة.

جدول (٤–٨) درجات مخاطر أجهزة الليزر.

أما متطلبات التوسيم فتتضمن وضع إشارات وعلامات ملائمة تحذر بالخطر ويبين جدول (٤-٩) الملامح الهندسية والمتطلبات التوسيمية المطلوبة لأجهزة الليزر ذوي درجات المخاطر المختلفة.

أما إدارة الصحة والأمان المهني (OSHA) فتتولى تنظيم ومراقبة الاستخدام الآمن لأجهزة الليزر في الصناعة والطب وغيرهما. وتحدد هذه الإدارة المتطلبات التي ينبغي استيفاءها بالنسبة للمستخدمين من حيث التأهيل والتدريب، كما تراقب متطلبات توسيم الأماكن ومستويات التعرض القصوى المسموح بها، وتوفر المعدات الواقية الملائمة للعيون والجلد. ووفقاً لمتطلبات هذه الإدارة، يجب ألا يتعرض العاملون بأشعة الليزر لكثافة قدرة ليزرية ضوئية تتجاوز الآتي:

البيان	الدرجة			
	الأولى	الثانية	الثالثة	الرابعة
ملامح الأمان				
توفر هيكل واقي	نعم	نعم	نعم	نعم
توفر أقفال أمان	نعم	نعم	نعم	نعم
وحدة تحكم إضافية	—	—	نعم	نعم
مراقبة للمفتاح	—	—	نعم	نعم
مبين انبعاث حزمة الأشعة	نعم	نعم	نعم	نعم
موهن الحزمة	نعم	نعم	نعم	نعم
متطلبات التوسيم				
شهادة التصنيع واسم المصنع	نعم	نعم	نعم	نعم
الدرجة وعلامة تحذير بارزة	—	نعم	نعم	نعم
توسيم مخرج الحزمة	—	نعم	نعم	نعم
مخرج الإشعاع	—	نعم	نعم	نعم
الهياكل الواقية غير المغلقة	—	نعم	نعم	نعم

جدول (٤-٩) الملامح الهندسية ومتطلبات التوسيم لأجهزة الليزر.

أ – ١ ميلي واط/سم٢ في حالة المراقبة المباشرة.

ب – ١ ميللي واط /سم٢ في حالة التعرض الطارئ (غير المقصود).

ج – ٢,٥٠ واط/سم٢ في حالة الضوء المتشتت المنعكس.

وتقوم هذه الإدارة بوضع التفاصيل الفنية لبنود ومتطلبات التفتيش على أجهزة الليزر، وقياس العديد من الخصائص الفنية لهذه الحزم التي تخرج عن إطار هذا الكتيب لشدة تخصصها وتعقيداتها العلمية. ومن القيم واجبة القياس خصائص حزمة الليزر عند انبعاثها من مخرج الجهاز كقياس طاقتها وقدرتها وتركزها وزاوية تفرقها. كذلك، ينبغي التفتيش على خصائص موهنات الحزم الليزرية وجميع المعدات الواقية، وعلى تدريب العاملين على استخدام تلك المعدات بشكل آمن.

الفصل الخامس

الأشعة المؤينة

٥-١ تعريف الأشعة المؤينة

يطلق مصطلح الأشعة المؤينة على الموجات الكهرمغنطيسية عالية الطاقة (أي التي تزيد طاقتها على عدة عشرات الإلكترون فولط) ومنها الأشعة السينية وإشعاعات جاما اللائي تم التعرف عليهما في الفصل الأول. كذلك، يطلق نفس المصطلح على جميع الجسيمات الذرية والنووية المشحونة والمتعادلة الشحنة التي تتميز بطاقة حركية يزيد مقدارها على عدة عشرات أو مئات الإلكترون فولط مثل الإلكترونات وجسيمات ألفا وبيتا وغيرها. والإلكترون فولط هو وحدة لقياس الطاقة في المجال الذري والنووي وهو وحدة صغيرة للغاية بالمقارنة بالجول المستخدم للتعبير عن الطاقة في النظام المعياري العالمي، حيث أن الإلكترون فولط يساوي ١,٦ × $١٠^{-١٩}$ جول.

وتطلق صفة المؤينة على هذه الإشعاعات والجسيمات لأنها قادرة على تأيين ذرات المادة، بما فيها ذرات خلايا الكائنات الحية، عند سقوطها عليها لتمتعها بطاقة عالية. ويقصد بتأيين الذرة فصل أحد إلكتروناتها المدارية بحيث يصبح هذا الإلكترون غير تابع للذرة الأم وينطلق بعيداً عنها. وتبقى الذرة الأم متأينة، أي فاقدة لأحد إلكتروناتها، ويقال عندئذ أنها تحولت لأيون موجب نظراً لفقدها إلكترون سالب الشحنة.

وتتمثل المخاطر الهائلة للإشعاعات المؤينة في أنها تتسلل إلى الجسم خفية فلا يحس الإنسان منها بأي أثر حراري، ولا يمكن رؤيتها أو الإحساس بها بأي نوع من أنواع الحس البشري، ولا يمثل مرورها في الجسم إحداث أي وخز أو ألم. وعند مرور هذه الأشعة في المادة فإنها تنقل طاقتها إلى ذرات تلك المادة وتؤدي عبر آليات مختلفة، مباشرة أو غير مباشرة، إلى إحداث التأيين الذي قد يترتب عليه أسوأ العواقب. وقبل الدخول في مخاطر الأشعة المؤينة ينبغي التعرف على بعض أنواعها وأهم خصائص هذه الأنواع.

تتوزع الأشعة المؤينة من حيث خصائصها العامة إلى مجموعتين هما مجموعة الأشعة الكهرمغنطيسية، ومجموعة الأشعة الجسيمية.

٥-٢ مجموعة الأشعة الكهرمغنطيسية

وتتضمن الأشعة السينية سواء الإنكباحية أو المميزة (راجع الفصل الأول) وكذلك إشعاعات جاما التي تنطلق من النوى المثار. وتتفاعل فوتونات الأشعة السينية سواء الانكباحية أو المميزة من خلال عمليتين يطلق على الأولى العملية الكهروضوئية حيث يتفاعل خلالها الفوتون (من خلال المجال الكهربائي أساساً) مع إلكترون مداري في الذرة إذا كانت طاقة الفوتون كافية، فيفنى الفوتون تماماً ويصبح عديم الوجود، وتنتقل طاقته إلى هذا الإلكترون، فينفصل من ارتباطه بذرته الأم مستهلكاً قدراً معلوماً من الطاقة، يساوي طاقة ترابط الإلكترون مع ذرته الأم، ويحمل هذا الإلكترون الجزء الباقي من الطاقة كطاقة حركية . أما العملية الثانية فيطلق عليها اسم تشتت أو استطارة كمبتون، ويمكن أن تحدث على الإلكترونات الحرة أو ضعيفة الارتباط بالنواة. وخلال عملية استطارة كمبتون ينحرف الفوتون عن مساره ويفقد جزءاً من طاقته مانحاً إياها للإلكترون، الذي ينطلق حاملاً فرق طاقتي الفوتون قبل التشتت وبعده.

وهكذا، فإنه نتيجة لتفاعل الأشعة السينية مع المادة تنطلق إلكترونات كهروضوئية أو بالتشتت، وتقوم هذه الإلكترونات بعملية تأيين ذرات المادة التي تنتشر فيها. لذلك، يقال أن الأشعة السينية تنتمي إلى الإشعاعات المؤينة.

ويمكن للأشعة السينية أن تخترق المواد لمسافات كبيرة حيث أنها موجة ولا تحمل شحنة كهربائية. وتزداد قدرة الأشعة السينية على اختراق المادة كلما زادت طاقتها، كما تقل إمكانية امتصاصها في المادة كلما زادت هذه الطاقة. لذلك تستخدم الأشعة السينية في التصوير الصناعي والطبي للكشف عن العيوب الصناعية أو لأغراض التشخيص، فضلاً عن استخدامها في مجال العلاج والتعقيم.

وتجدر الإشارة إلى أن الجزء الأكبر من الأشعة السينية المستخدمة في التشخيص الإشعاعي يمتص داخل الجسم البشري وبصفة خاصة في الطبقة

السطحية من الجسم، بالنسبة لأجهزة الأشعة ذات الجهد المنخفض (أي ذات الطاقة المنخفضة). وبذلك، تمثل هذه الأشعة أحد أعظم المخاطر على الإطلاق على الإنسان وتسهم بالنصيب الأكبر من هذه المخاطر، نظرا للانتشار الواسع لتطبيقاتها، خاصة في التشخيص الطبي.

وكما ورد في الفصل الأول فإن إشعات جاما تنتمي لفئة الموجات الكهرمغنطيسية عالية الطاقة وأنها تنطلق من النوى المثار.

وتتصف إشعاعات جاما بالخاصية الذاتية نفسها التي تتصف بها الأشعة السينية المميزة. حيث يتميز كل نظير مشع لأشعة جاما (وليس عنصر) بإطلاق طيف بخطوط طاقة محددة القيمة والنسب، يختلف عن الطيف الذي يطلقه نظير آخر لنفس العنصر. لذلك، يقال أن أشعة جاما تعتبر بصمة من بصمات النظير الذي يطلقها، ويمكن عند قياس أطيافها التعرف على المكونات النظائرية للمواد المختلفة. فعلى سبيل المثال تصدر نواة نظير السيزيوم ١٣٧ بعد تفككها إلى نواة الباريوم ١٣٧ إشاعات جاما بطاقة واحدة تبلغ ٦٦١,٧ كيلو إلكترون فولط في حين تصدر نواة نظير السيزيوم ١٣٤ بعد تفككها إلى نواة الباريوم ١٣٤ عدداً من خطوط إشاعات جاما أكثرها كثافة خطان بطاقتين هما ٦٠٤,٥ ، ٧٩٥,٧ كيلو إلكترون فولط.

وتتفاعل إشاعات جاما مع المادة بنفس الأسلوبين اللذين تتفاعل من خلالهما الأشعة السينية مع المادة، أي من خلال الظاهرة الكهروضوئية وتشتت كمبتون على الإلكترونات المدارية. فضلاً عن ذلك يمكن أن تتفاعل إشاعات جاما عالية الطاقة (التي تزيد طاقتها على حوالي ١,٠٢ ميغا إلكترون فولط) مع المادة من خلال عملية يطلق عليها "إنتاج الأزواج" . وتحدث هذا العملية عندما يتفاعل الفوتون الساقط مع المجال الكهربائي الشديد للنواة (أي عندما يقترب فوتون جاما كثيراً من نواة ما) فيفنى الفوتون تماما، وينطلق بدلاً منه زوج من الجسيمات هما إلكترون وبوزترون يحملان معاً ما يزيد على الطاقة اللازمة لتوليد كتلتيهما (وهي ١,٠٢ ميغا إلكترون فولط) في صورة طاقة حركية.

وهكذا، يلاحظ أنه نتيجة لتفاعل إشاعات جاما مع أية مادة بأي من الآليات الثلاثة للتفاعل ينطلق عن هذا التفاعل إلكترونات أو بوزترونات، وتقوم هذه الجسيمات، بدورها، بتأيين ذرات المادة عند مرورها خلالها. وبالتالي، تنتمي إشاعات جاما كذلك

للأشعة المؤنية وإن كان التأين هناغير مباشر (أي بالإلكترونات أو البوزترونات المنطلقة عن تفاعل إشعاعات جاما مع المادة).

وتتميز أشعة جاما بقدرة هائلة على اختراق المواد، لدرجة أنها يمكن أن تخترق جداراً كبير السماكة من الخرسانة المسلحة دون أن تنخفض طاقتها أو تتغير خصائصها. فعندما تسقط حزمة من إشعاعات جاما وحيدة الطاقة ومكونة من عدد محدد من الفوتونات على مادة ما فإن هذه الفوتونات تتغلغل في خط مستقيم داخل المادة، بحيث يتناقص عددها تدريجيا مع زيادة عمق التغلغل بسبب تفاعل بعضها مع إلكترونات أو نوى المادة دون أن يتفاعل البعض الآخر، وبالتالي لا تتغير طاقة الفوتونات التي تجتاز هذا العمق دون تفاعل. لذلك، فإنه عند سقوط هذه الأشعة على الأنسجة البشرية فإن تأثيراتها التأيينية تتوزع داخل كافة الأنسجة على الأعماق المختلفة، بل ويمكن أن تخترق بعض فوتوناتها الجسم البشري دون أن تتفاعل معه أو أن تترك أثراً فيه.

وتستخدم إشعاعات جاما التي تنبعث من نظائر مشعة مختلفة كالسيزيوم ١٣٧، والتكنيشيوم ٩٩م، والكوبلت ٦٠، واليود ١٣١، والأيريديوم ١٩٢، وغيرها في العديد من المجالات التطبيقية الصناعية والطبية، سواء لأغراض الاختبارات غير الاتلافية، أو مراقبة وتوكيد جودة المنتجات، أو في التشخيص والعلاج والتعقيم وحفظ الأغذية، وغير ذلك من الجوانب التي لم يعد يخلو منها ميدان في الصناعة والزراعة والطب وغيرها.

٥-٣ مجموعة الجسيمات المادية

وتتضمن هذه المجموعة الإلكترونات وعدداً كبيراً من الجسيمات النووية (أي التي تنطلق من نواة الذرة عند تفككها أو عند تفاعل الجسيمات السريعة المختلفة مع النوى (نوى الذرات) وسوف نورد خصائص ومصادر بعض هذه الجسيمات التي انتشر استخدامها في التطبيقات الصناعية والطبية والبحثية وغيرها.

٥-٣-١ جسيمات ألفا

جسيم ألفا هو عبارة عن نواة ذرة الهليوم، التي تتكون من بروتونين ونيوترونين مترابطين معاً ككتلة واحدة. ويعتبر جسيم ألف من الجسيمات المشحونة الثقيلة حيث

تتضمن شحنتين هما شحنتا البروتونين. وتنطلق جسيمات ألفا تلقائياً عند تفكك بعض النظائر المشعة الأثقل من الرصاص مثل اليورانيوم ٢٣٨ والراديوم ٢٢٦ والرادون ٢٢٢ والثوريوم ٢٣٢ والبولونيوم ٢١٠ وغيرها. وتعتبر طاقة جسيمات ألفا المنطلقة من تفكك النظائر المشعة بصمة من بصمات النظير الذي يطلقها، حيث يصدر كل نظير جسيمات ألفا بطاقة أو بطاقات محددة القيمة، إلا أن جميع قيم طاقات جسيمات ألفا المنطلقة عن جميع النظائر المختلفة تتراوح بين حوالي ٤ إلى ٨ ميغا إلكترون فولط.

ونظراً للثقل الكبير لجسيمات ألفا (حيث تبلغ كتلتها حوالي ٧٣٥٠ ضعف كتلة الإلكترون) فإنها لا تستطيع أن تتغلغل عميقاً في المادة. فجسيمات ألفا التي تنطلق عن اليورانيوم مثلاً والتي تبلغ طاقة خطها الرئيس ٤,١٩٦ ميغا إلكترون فولط، لا تستطيع أن تخترق الهواء الجوي عند الضغط المعياري لأكثر من ٣,٩ سم فقط، ويحدث هذا الجسيم ضمن هذا المدى القصير حوالي ١٢٠ ألف تأيين (أي يؤين ١٢٠ ألف ذرة). أما في الجسم البشري فلا يستطيع هذا الجسيم أن يخترق النسيج البشري لأكثر من حوالي ٤٠ ميكروناً (٠,٠٤ ملليمتر) ويحدث في هذا المدى القصير نفس العدد من التأينات التي يحدثها في الهواء. لذلك، فإنه يسهل الوقاية من مخاطر جسيمات ألفا، طالما كان مصدرها موجوداً في الهواء، حيث تكفي طبقة من الهواء سمكها حوالي ٤ سم أو ورقة رقيقة لا يزيد سمكها عن حوالي ٥٠ ميكرون للوقاية من مخاطرها. أما عند دخول المادة التي تنبعث منها جسيمات ألفا داخل الجسم البشري سواء مع الطعام أو الماء أو هواء التنفس أو من خلال الجروح، فتعتبر هذه الجسيمات هي الأخطر على الإطلاق لتركز قدرتها التأيينية في طبقة رقيقة، وبالتالي، تركز أثرها المؤين حول نقطة إصدارها.

٥-٣-٢ جسيمات بيتا

هي جسيمات تنطلق عن تفكك نواة الذرة عندما تتضمن هذه النواة خللاً في نسبة النيوترونات إلى البروتونات. فالنواة المستقرة (أي غير القابلة للتفكك) هي تلك النواة التي تكون النسبة بين مكونيها وهما النيوترونات والبروتونات هي نسبة الاستقرار.

وتبلغ هذه النسبة ١ للنوى الخفيف كالهليوم (٢:٢) والكربون (٦:٦) والأكسجين (٨:٨)، وتزيد تدريجياً كلما زادت كتلة النواة حتى تصل هذه النسبة إلى حوالي ١,٦ عند أثقل النظائر الموجودة طبيعياً كاليورانيوم ٢٣٨.

فعلى سبيل المثال نجد أن نواة نظير الكربون ١٢ التي يتكون من ٦ نيوترونات ، ٦ بروتونات مستقرة تماماً، أما نواة الكربون ١٤ التي تتكون من ٨ نيوترونات ، ٦ بروتونات قد تضمنت خللاً في النسبة ، لذلك فهي مشعة وتصدر جسيم بيتا سالب ليتحول أحد النيوترونات (متعادل الشحنة) داخل النواة إلى بروتون فتتكون نواة النتروجين بدلاً من الكربون..

وهناك نوعان من جسيمات بيتا التي تصدر عن نواة الذرة هما جسيمات بيتا السالبة والموجبة. وجسيمات بيتا السالبة تصدر عندما يتمثل الخلل في زيادة نسبة النيوترونات في النواة، وأما جسيمات بيتا الموجبة فتصدر من النواة عندما يتمثل الخلل في نقص نسبة النيوترونات (أي زيادة نسبة البروتونات) . وجسيمات بيتا السالبة هي ذاتها الإلكترونات حيث أن شحنة هذا الجسيم وكتلته هي نفس شحنة وكتلة الإلكترون. أما جسيمات بيتا الموجبة فلها نفس كتلة جسيمات بيتا السالبة إلا أن شحنتها الكهربائية موجبة رغم تساويها في المقدار مع شحنة الإلكترون.

ونظراً للصغر الشديد لكتلة جسيم بيتا بالمقارنة بجسيم ألفا فإنه يستطيع أن يتغلغل لمسافات أكبر كثيراً في الهواء. فجسيم بيتا الذي تبلغ طاقته حوالي ١ ميغا إلكترون فولط يستطيع أن يتغلغل في الهواء عند الظروف المعيارية حوالي ٤ أمتار (أي أكثر من مائة ضعف مدى جسيم ألفا بطاقة ٤,٢ ميغا إلكترون فولط). ويبلغ مدى نفس هذا الجسيم في الجسم البشري حوالي ٠,٥ سم. كذلك، ينبغي التنويه إلى أن قدرة جسيمات بيتا على التأيين أقل كثيراً من قدرة جسيمات ألفا بسبب صغر كتلة الأولى وسرعتها الكبيرة بالمقارنة بجسيمات ألفا . لذلك، تمثل مصادر جسيمات بيتا مخاطر خارجية على الجسم البشري حتى في حال عدم دخول النظائر التي تصدرها داخل جسم الإنسان، مع العلم أن الجلد والأنسجة التي تدنوه تكون هي الأعضاء المتأثرة بهذه الجسيمات.

وفضلاً عن جسيمات بيتا التي تنطلق من عدد من النظائر المشعة، تستخدم على مستوى العالم حالياً آلاف المعجلات النووية التي تقوم بتعجيل الإلكترونات لطاقات

عالية تبدأ من عدة مئات الكيلو إلكترون فولط حتى عدة عشرات بل ومئات الميغا إلكترون فولط. وتستخدم هذه الحزم الإلكترونية المعجلة في العديد من المجالات الصناعية كتحسين خواص المنتجات كالمطاط والدهانات المختلفة وفي أعمال القطع واللحام وغيرها. كذلك يتم في هذه المعجلات كبح هذه الإلكترونات على مواد ثقيلة مثل التنغستن وغيرها للحصول على تدفق هائل من الأشعة السينية عالية الطاقة لاستخدامها في العمليات الصناعية المتعددة وفي عمليات التعقيم وإطالة عمر الأغذية دون تلف وفي غيرها من التطبيقات المفيدة.

٥-٣-٣ النيوترونات

النيوترونات هي جسيمات متعادلة الشحنة وكتلتها تساوي تقريباً كتلة البروتون. وتكوّن النيوترونات مع البروتونات نوى الذرات ، لذا يطلق عليهما معاً اسم نيوكلونات. والنيوترون الحر (أي خارج النواة) لا يعيش طويلاً، وإنما يتفكك إلى بروتون وإلكترون (جسيم بيتا سالب) مع انطلاق جسيم آخر يطلق عليه نيوترينو مضاد، له كتلة سكون مساوية للصفر، وهي العملية المعروفة بتفكك بيتا السالب للنيوترون. ويبلغ متوسط عمر النيوترون بعد خروجه من النواة حوالي ١٥,٥ دقيقة يتفكك بعدها.

وتعتبر النيوترونات من أخطر الأجسام المؤينة رغم أنها عديمة الشحنة، وبالتالي، لا تؤين ذرات المادة بطريقة مباشرة. إلا أنه عندما تتفاعل النيوترونات مع النسيج البشري الذي يتكون في معظمه من الماء ويتضمن عدداً هائلاً من ذرات الهيدروجين، تتصادم النيوترونات مع البروتونات التي هي نواة ذرة الهيدروجين، بنفس أسلوب تصادم كرات البلياردو لتساوي كتلتي النيوترون والبروتون، وبالتالي، تنتقل الطاقة الحركية من النيوترون إلى البروتون. ويفقد النيوترون السريع جل طاقته مانحاً إياها للبروتونات (نوى ذرات الهيدروجين) بعد حوالي ١٥-١٨ تصادماً، وتكتسب البروتونات الطاقة من هذه التصادمات فتقوم بدورها بتأيين ذرات المادة بنفس الأسلوب الذي تؤين به جسيمات ألفا المادة.

وبالتالي، تعتبر النيوترونات من الجسيمات المؤينة بطريقة غير مباشرة، حيث تمنح طاقتها للبروتونات التي تقوم بدورها بالتأيين. وتتمثل مخاطر النيوترونات في أنها غير مشحونة وبالتالي تستطيع أن تخترق المواد بسهولة لمسافات عميقة وعندما تمد طاقتها لنوى ذرات الهيدروجين تقوم البروتونات بدور الجسيم المشحون الثقيل الذي يؤين ذرات الوسط الذي تنتشر فيه بتركيز مرتفع. فضلا عن ذلك، يمكن أن يمتص النيوترون (بعد أن يفقد طاقته) في نواة ذرة ما فيحولها لنظير مشع، يتفكك لاحقا مصدرا جسيمات بيتا وقد تتبعها إشعاعات جاما. لذلك، تمثل النيوترونات أكبر المخاطر على الإنسان بالمقارنة بباقي أنواع الجسيمات المؤينة.

٥-٣-٤ أنواع أخرى من الأشعة المؤينة

هناك عدد آخر من الأشعة والجسيمات المؤينة التي تقوم بتأيين ذرات المادة مثل الميونات التي تعرف كذلك بالميزونات ومنها ميزونات ميو وميزونات باي، ويتميز كل منها، من حيث الشحنة، إلى ميونات سالبة الشحنة وأخرى موجبة الشحنة وثالثة متعادلة، فضلاً عن العديد من الجسيمات التي توصف خطأً بالجسيمات الأولية، والتي يمكن أن تنبعث نتيجة للتفاعلات والتفككات النووية المختلفة.

٥-٤ تأثيرات الأشعة المؤينة ووحدات قياس جرعاتها

عند سقوط الأشعة المؤينة سواء الموجبة أو الجسيمية على الخلايا الحية تمنح هذه الأشعة طاقتها لهذه الخلايا، ويتمثل ذلك في تأيين بعض ذرات الخلايا. وحيث أن الماء هو المكون الرئيس لمعظم الكائنات الحية فإن التأيين يحدث أساساً في ذرات الماء التي تتحول إلى أيون ماء موجب الشحنة H_2O^+ وإلكترون سالب. وتتفاعل الأيونات الموجبة والإلكترونات السالبة مع باقي مكونات الخلية الحية، فيتكون الهيدروجين (H) والهيدروكسيد (OH) وجزيئات فوق أكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، وهي جميعاً من الجذور الكيميائية الحرة شديدة النشاط الكيميائي. وتحدث جميع هذه العمليات خلال جزء من مليون جزء من الثانية من لحظة دخول الأشعة المؤينة لجسم الكائن الحي. وبعد ذلك تتفاعل الجذور الكيميائية الحرة والنشطة مع المركبات العضوية المختلفة

للخلية مثل الكروموسومات أو جزيئات DNA، فيؤدي ذلك إلى تكسير التراكيب السلسلية الطويلة للكروموسومات، وإحداث بعض التغيرات المستديمة في الجينات تحدث اختلالا في التركيب الجيني للخلية قد يتطور إلى طفرات أو تشوهات مستديمة في الخلية تنتقل وراثيا إلى الخلايا الجديدة في الشخص المتعرض للأشعة المؤينة أو إلى الأجيال التالية (الأبناء والأحفاد).

وهكذا، يتمثل تأثير الأشعة المؤينة على الخلية الحية في النهاية في حدوث تلف في الخلية قد يؤدي إلى موتها أو إلى ظهور سرطانات قاتلة في العديد من الأعضاء والأنسجة الحية، أو إلى أمراض وراثية في أبناء وأحفاد المتعرض للأشعة المؤينة.

وقد اتضح أن الطاقة التي تحملها الأشعة المؤينة هي التي تسبب التلف للخلايا، وبالتالي التأثيرات الضارة بها. وتسمى كمية الطاقة المودعة من الأشعة المؤينة في الجسم بالجرعة. ويمكن أن تودع الجرعة من أية نواة مشعة أو أي عدد من النوى سواء كانت موجودة خارج الجسم أو سواء دخلت هذه النوى داخل الجسم مع الطعام أو هواء التنفس أو الجروح.

١-٤-٥ الجرعة الممتصة

يطلق على كمية الطاقة المودعة في وحدة الكتلة من الجسم المادي مصطلح الجرعة الممتصة. فعندما يمتص نسيج ما كتلته نصف كيلو غرام، مثلاً، كمية من الطاقة من الاشعة المؤينة مقدارها ٢ جول مثلاً، يقال أن الجرعة الممتصة في هذا النسيج هي ٢÷٠,٥ = ٤ غراي. والغراي هو وحدة قياس الجرعة الممتصة في النظام المعياري العالمي، ويعني امتصاص طاقة مقدارها جول واحد في الكيلوغرام الواحد. وفي الماضي كانت الجرعة الممتصة تقاس بوحدة أخرى أطلق عليها اسم "راد". وكلمة راد هي عبارة عن الحروف الأولى من ثلاث كلمات هي radiation absorbed dose - rad والراد الواحد أصغر مائة مرة من الغراي، أي أن الغراي، يعادل مائة راد (١ غراي=١٠٠ راد).

نوع الأشعة	المعامل المرجح	نوع الأشعة	المعامل المرجح
أشعة سينية	١	نيوترونات سريعة	٢٠
أشعاعات جاما	١	نيوترونات متوسطة الطاقة	١٠
جسيمات بيتا	١	نيوترونات حرارية	٥
جسيمات ألفا	٢٠		

جدول (٥-١): قيم المعاملات المرجحة لبعض أنواع الإشعاع

٥-٤-٢ الجرعة المكافئة في النسيج أو العضو

تبين أن الضرر الذي يحدث في نسيج أو عضو ما من الجسم البشري لا يتوقف على كمية الجرعة الممتصة في هذا النسيج فحسب، وإنما يتوقف كذلك، على نوع الأشعة التي امتصت طاقتها. فقد تبين أن جرعة من الطاقة الممتصة من جسيمات ألفا، على سبيل المثال في نسيج ما، تحدث في هذا النسيج تلفا يعادل عشرين ضعف التلف الذي تحدثه نفس الجرعة الممتصة من أشعة جاما منخفضة الطاقة أو الأشعة السينية. لذلك، يوزن الضرر الواقع على النسيج أو العضو المتعرض للأشعة المؤينة من خلال كل من مقدار الجرعة الممتصة في هذا العضو، وكذلك معامل يعرف باسم المعامل المرجح لوقوع الضرر بالنسبة للنوع المعين من الأشعة، والذي يطلق عليه المعامل المرجح (أو المعامل الوزني) للإشعاع W_R ويبين جدول (٥-١) قيم المعاملات المرجحة لبعض أنواع الإشعاعات المؤنية .

وتعرف الجرعة الموزونة بالمعامل المرجح للإشعاع باسم الجرعة المكافئة في عضو أو نسيج، فالجرعة المكافئة في عضو أو نسيج هي عبارة عن حاصل ضرب كل من الجرعة الممتصة في هذا العضو في المعامل المرجح للإشعاع، وتقاس في النظام المعياري العالمي بوحدة سيفرت "Sv" في حين كانت تقاس في النظام القديم بوحدة

أطلق عليها اسم «رِم». وهكذا، فإن الجرعة المكافئة في عضو ما بالسيفرت هي حاصل ضرب الجرعة الممتصة في العضو بالغراي في المعامل المرجح لنوع الأشعة، أما الجرعة المكافئة بوحدة رِم في العضو، فهي عبارة عن حاصل ضرب الجرعة الممتصة بالراد في المعامل المرجح للنوع المحدد من الأشعة. ومن هذا المنطلق تبقى العلاقة بين السيفرت والرم هي أن السيفرت يعادل ١٠٠ رم.

٥-٤-٣ الجرعة الفعالة

تبين كذلك، أن بعض أجزاء الجسم البشري تكون أكثر حساسية لاستحثاث السرطان القاتل فيها بالمقارنة بالأجزاء الأخرى. فعند إصابة عضوان مختلفان من الجسم، وليكونا الرئة والكبد مثلاً، بنفس الجرعة المكافئة تبين أن نسبة احتمال ظهور السرطان في الرئة إلى احتمال ظهوره في الكبد تكون كنسبة ١٢ : ٥ . كما تتميز الأجهزة التناسلية عند كل من الرجل والمرأة بحساسية شديدة للإشعاع من حيث إنجاب أبناء أو أحفاد مشوهين بسبب التعرض الإشعاعي. وعلى ذلك، فقد خصصت لأعضاء وأنسجة الجسم البشري المختلفة نسب مرجحة يطلق عليها المعامل المرجح للضرر في العضو أو النسيج. وللحصول على الاحتمال الكلي لوقوع الضرر في الجسم كله يجب جمع الجرعات الفعالة لجميع الأعضاء والأنسجة للحصول على الجرعة الفعالة لاستحثاث الضرر في الجسم كله. والجرعة الفعالة، عموما، هي عبارة عن حاصل جمع نواتج ضرب الجرعة المكافئة في كل عضو أونسيج في جسم المتعرض على حدة في المعامل المرجح (كسر من واحد صحيح) لهذا العضو أو النسيج. ويقصد بمصطلح الجرعة الفعالة قيمة تمثل احتمال حدوث الضرر وتحديداً ضرر الإصابة بالسرطان القاتل. ويبين جدول ٥-٢ قيم المعاملات المرجحة للأعضاء والأنسجة البشرية المختلفة.

العضو	المعامل المرجح للعضو	العضو	المعامل المرجح للعضو
المبيض أوالخصيتين	٠,٢٠	الغدد	٠,٠٥
نخاع العظام الأحمر	٠,١٢	الثدي	٠,٠٥
القولون	٠,١٢	الكبد	٠,٠٥
الرئتين	٠,١٢	المريء	٠,٠٥
المعدة	٠,١٢	الجلد	٠,٠١
سطح العظام	٠,٠٥	باقي الأعضاء	٠,٠١
المثانة	٠,٠٥	كامل الجسم	١

جدول ٥-٢: المعاملات المرجحة للأعضاء البشرية

٥-٤-٤ الجرعة الفعالة الجماعية

هي الجرعة الفعالة التي تودعها الإشعاعات في مجموعة معينة من البشر. وفي حالة تساوي الجرعة الفعالة لجميع أفراد المجموعة تكون الجرعة الفعالة الجماعية هي حاصل ضرب الجرعة الفعالة المتوسطة لكل فرد في عدد أفراد المجموعة. فإذا تعرض مائة فرد ، على سبيل المثال، بواقع ٠,٠٢ سيفرت (أي ٢٠ مللي سيفرت / سنة) للفرد الواحد تكون الجرعة الفعالة الجماعية للمجموعة هي ١٠٠X٠,٠٢ = ٢ فرد.سيفرت/سنة، أما عند اختلاف الجرعة الفعالة الفردية تكون الجرعة الفعالة الجماعية هي حاصل جمع الجرعات الفردية لجميع أعضاء المجموعة. ووحدة قياس الجرعة الفعالة الجماعية في النظام المعياري العالمي هي فرد. سيفرت، وفي النظام القديم هي فرد.رم.

٥-٤-٥ معامل الخطورة R

هو معامل يبين احتمال الإصابة بالسرطان القاتل عند التعرض لجرعة فعالة معينة. فعندما يقال أن معامل الخطورة يساوي ٦ × ١٠$^{-٢}$ لكل فرد . سيفرت، فمعنى

ذلك أنه عندما يتعرض هذا الفرد الوحيد لجرعة فعالة مقدارها ١ سيفرت يكون احتمال وفاته بالسرطان القاتل الناتج عن الأشعة هي ٠,٠٦ (أي ستة أفراد من كل ١٠٠ فرد يتعرضون لنفس الجرعة). ويمكن حساب عد حالات السرطانات المحتملة في مجموعة من البشر بضرب الجرعة الفعالة الجماعية في هذه المجموعة في معامل الخطورة. فعندما تصدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة، وهي إحدى الهيئات العلمية العالمية المسؤولة عن تقويم الجرعات والمخاطر الإشعاعية في العالم، أن الجرعة الفعالة الجماعية من فحوص الأشعة السينية في العالم تبلغ مابين حوالي ٢ إلى ٥ مليون فرد. سيفرت، في السنة، وبقيمة متوسطة حوالي ٣ مليون فرد. سيفرت/سنة، فمعنى ذلك أنه، بسبب فحوص الأشعة السينية، يصاب سنوياً عدد يساوي ٣٠٠٠٠٠٠ × ٦ × $١٠^{-٢}$ = ١٨٠٠٠٠ شخص (مائة وثمانون ألف شخص في العالم) سنوياً، بالسرطان القاتل بسبب هذه الفحوص. وهنا تجدر الإشارة، إلى أن الإحصائيات تبين أن نسبة الوفيات من السرطانات المختلفة تبلغ حوالي ٢٠ ٪ من إجمالي الوفيات على مستوى العالم.

٥-٥ المصادر الطبيعية للأشعة المؤينة

حتى الآن يأتي الجزء الأكبر من جرعات الأشعة المؤينة التي تصيب كافة البشر على سطح البسيطة من مصادر أشعة طبيعية. إلا أنه مع التطور العلمي والتقني المتنامي بدأ عدد من المصادر الصنعية (أي من صنع الإنسان) يشكل نسبة متزايدة من مصادر التعرض للأشعة المؤينة. وسوف نحاول في هذه الفقرة سرد أهم مصادر التعرض للأشعة المؤينة والعروج على أفضل السبل لتلافي الجرعات الزائدة من كل مصدر منها.

٥-٥-١ الأشعة الكونية

يطلق مصطلح الأشعة الكونية على الأشعة المؤينة التي تصل سطح الأرض قادمة من الفضاء الخارجي. وتصنف الأشعة الكونية وفقاً لمصدرها ضمن صنفين، يطلق على الأول الأشعة الكونية المجرّية، وعلى الآخر الأشعة الكونية الشمسية، فضلاً عن حزامي الجسيمات المنحبسة.

وتقدم الأشعة الكونية المجرّية إلى الأرض من المجرات البعيدة وهي مجهولة المصدر والتكوين. وتتضمن الأشعة الكونية المجرية جسيمات مشحونة مثل البروتونات، ونوى ذرات الهليوم (وجسيمات ألفا) وأيونات بعض العناصر الثقيلة خاصة أيونات الحديد التي تمثل أعلى نسبة وفرة بين الأيونات الثقيلة. وتتراوح طاقات هذه الجسيمات المجرية بين عدة مئات الميغا إلكترون فولط وحتى مئات الآلاف من الميغا إلكترون فولط، ويمكن أن تصل طاقات بعض هذه الجسيمات لطاقات أعلى كثيراً من هذه الطاقات. وتزداد كثافة الأشعة الكونية المجرية القادمة للأرض في فترات النشاط الشمسي المنخفض حيث تتأثر هذه الأشعة، بشدة، بالمجال المغنطيسي الشديد المتولد أثناء النشاط الشمسي. كذلك تتأثر كثافة الأشعة الكونية المجرية تأثراً شديداً بالمجال المغنطيسي الأرضي، حيث يمنع هذا المجال بعض هذه الجسيمات والأيونات من الوصول إلى طبقة الغلاف الجوي المحيط بالأرض (حوالي ٥٠-١٠٠ كيلومتر فوق سطح الأرض) خاصة بالقرب من خط الاستواء الأرضي، ويحرف هذه الجسيمات نحو القطبين (الشمالي أو الجنوبي). وتمثل هذا الأشعة أكبر المخاطر بالنسبة للرحلات الجوية خاصة تلك التي تتم على ارتفاعات عالية (الطائرات الأسرع من الصوت التي تطير على ارتفاع حوالي ١٥-١٦ كيلومتر فوق سطح البحر)، والتي تمر عبر خطوط طيران قريبة من القطبين.

أما الأشعة الكونية الشمسية فإنها (كما يتبين من وصفها) تنبعث نحو الأرض من الشمس ولها نفس مكونات الأشعة الكونية المجرية إلا أن طاقاتها أقل كثيرا من طاقات الأشعة المجرية وتغلب عليها البروتونات ونوى الهليوم. وتتراوح طاقات الأشعة الكونية الشمسية بين حوالي ١ ومائة ميغا إلكترون فولط، ويمكن أن تصل أحياناً إلى حوالي ألف ميغا إلكترون فولط، خاصة في فترات الوهج الشمسي (flares) والاضطرابات المغنطيسية التي تتكرر دورتها مرة كل حوالي ١١ عاماً. وتمثل الأشعة الكونية الشمسية في فترات الوهج الشمسي مخاطر جسيمة على رواد الفضاء لما وراء الغلاف المغنطيسي، وكذلك بعض المخاطر حتى في المدارات القريبة من سطح الأرض. ورغم أن معدل تدفق الجسيمات الشمسية خلال العديد من السنوات الماضية يزيد كثيراً على معدل تدفق الجسيمات المجرية إلا أن مخاطر الجسيمات القادمة من الشمس أقل نسبياً من مخاطر الجسيمات المجرية من وجهة نظر التعرض الإشعاعي في الغلاف الجوي بسبب ضعف طاقات الجسيمات الشمسية بالمقارنة بطاقات الجسيمات المجرية.

أما الجسيمات المنحبسة فهي عبارة عن سحابة من الإلكترونات والبروتونات الحبيسة بفعل المجال المغنطيسي الأرضي في طبقتين أو حزامين يعرفان بحزامي فان ألن. وتزيد كثافة الحزامين بدرجة عالية عند دائرة الاستواء وتقل بالابتعاد عنها. ويوجد الحزام القريب من الأرض على مسافة عدة آلاف قليلة من الكيلومترات من سطحها في حين يوجد الحزام الآخر بعد حوالي ٢٠٠٠٠ كيلومتر من سطح الأرض. وتتراوح طاقات هذه الإلكترونات والبروتونات بين عدد قليل من الميغا إلكترون فولط وتصل إلى حوالي ١٠٠ ميغا إلكترون فولط. وتلعب البروتونات دوراً هاماً في التعرض الإشعاعي لرحلات الفضاء في حين تلعب الإلكترونات دوراً أكبر في التعرض الإشعاعي على سطح الأرض من الأشعة الكونية.

ويطلق على الجسيمات المختلفة المكونة للأشعة الكونية سواء الواردة من المجرات البعيدة أو من الشمس، أو البروتونات في حزامي فان ألن، الجسيمات الأولية. وتتفاعل هذه الجسيمات الأولية، عند وصولها للغلاف الجوي المحيط بالأرض، مع مكونات هذا الغلاف من نيتروجين وأكسجين، مما يؤدي إلى تولد وابل متكاثر من الجسيمات الثانوية. وفي المرحلة الأولى من هذه التفاعلات التي تحدث في الطبقات العليا للغلاف الجوي تكون النيوترونات والبروتونات والبيونات هي الجسيمات الثانوية السائدة. (البيونات هي جسيمات كتلتها أكبر من كتلة الإلكترونات بحوالي ٢٨٠ مرة، يطلق عليها اسم ميزونات باي ومنها جاءت التسمية، ويوجد منها البيونات الموجبة والسالبة والمتعادلة الشحنة). أما في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي تكون الإلكترونات والفوتونات والميونات (أي ميزونات ميو بأنواعها الثلاثة الموجبة والسالبة والمتعادلة الشحنة وتعادل كتلتها كتلة ٢٠٨ إلكترونا). وعند سطح الأرض تكون الميونات هي المصدر الرئيس لتعرض البشر من الأشعة الكونية وتتراوح طاقتها بين حوالي ٠,٢ ميغا إلكترون فولط وحوالي ٢٠ غيغا إلكترون فولط. كذلك، يوجد طيف من النيوترونات متنوعة الطاقة عند سطح الأرض تزداد كثافته بالارتفاع عن سطح البحر وتتراوح طاقات النيوترونات في هذا الطيف بين النيوترونات الحرارية (أي شديدة البطء التي لا تزيد سرعة النيوترون عندها على ٢٠٠٠ متر/ثانية وتبلغ طاقاتها حوالي ٠,٠٢ إلكترون فولط)، والسريعة التي تصل طاقاتها حتى حوالي ١٠٠ ميغا إلكترون فولط. ويطلق على هذه الجسيمات الثانوية في الغلاف الجوي المنخفض وعند سطح الأرض مصطلح الأشعة الكونية .

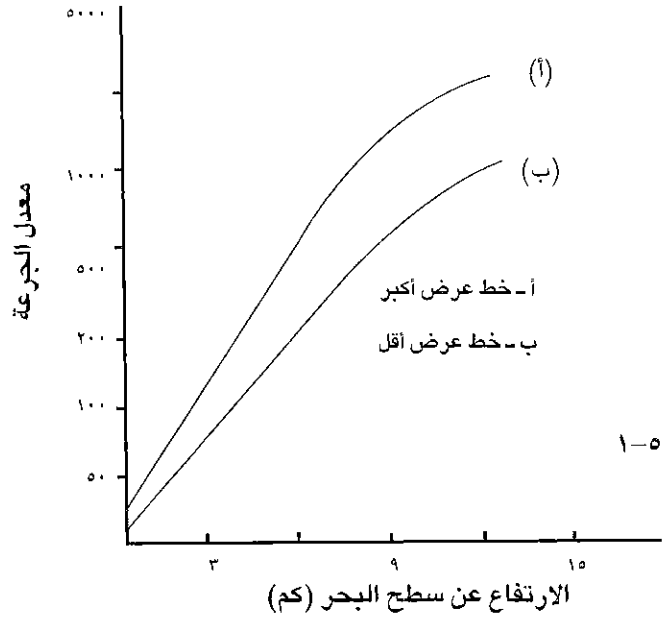
٥-٥-٢ جرعات التعرض البشري من الأشعة الكونية

تقدر الجرعة الإشعاعية المتوسطة التي يتعرض لها كل شخص، على ظهر الأرض من الأشعة الكونية بحوالي ثلث الجرعة الإجمالية التي يتعرض لها من الإشعاعات المؤينة الخارجية الموجودة طبيعيا في البيئة. ويقصد بالإشعاعات الخارجية تلك الإشعاعات التي تقدم من الفضاء الخارجي والتي تنطلق عن مواد مشعة موجودة في القشرة السطحية الأرضية، خارج جسم الإنسان.

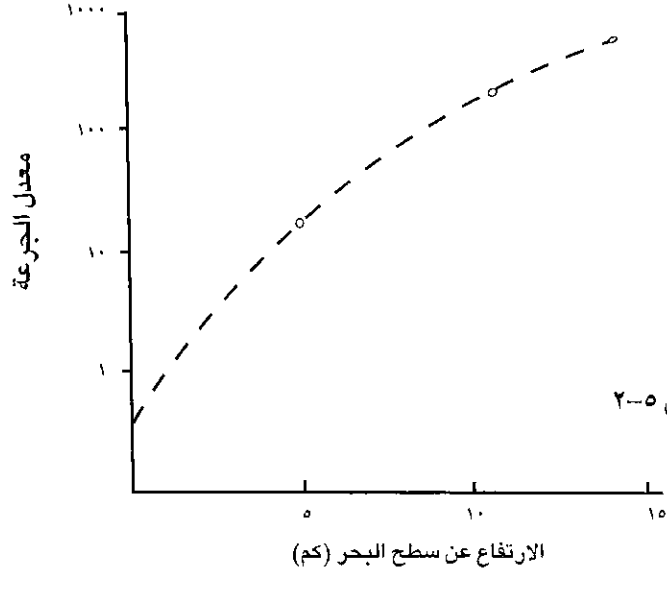
وتعتمد الجرعة التي يحصل عليها شخص ما من الأشعة الكونية على عدة عوامل، هي موقعه من حيث خط العرض، وارتفاعه عن سطح البحر، وكذلك من حيث نوع المبنى الذي يعيش فيه، والدروع الطبيعية التي تحميه. فمن حكمة الخالق، عز وجل، وجود الغلاف الجوي المحيط بالأرض الذي يقينا من مخاطر الجسيمات الكونية الأولية، ويعتبر بمثابة درع من الماء يبلغ سمكه حوالي ١٠ أمتار. ويبين شكل (٥-١) معدلات الجرعة الفعالة من المركبات مباشرة التأين (أي من الجسيمات المشحونة من الأشعة الكونية) كدالة من الارتفاع عن سطح البحر، عند خطي عرض أحدهما قريب من خط الاستواء (شمالا أو جنوبا)، والآخر عند خط عرض متوسط بين خط الاستواء وأي من القطبين (الشمالي أو الجنوبي). كذلك، يبين شكل (٥-٢) كيفية تغير معدل الجرعة كدالة من الارتفاع من النيوترونات بصفتها المركبة الرئيسة للجسيمات غير مباشرة التأين وذلك عند خط عرض متوسط بين خط الاستواء وأي من القطبين.

وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة، في تقاريرها المختلفة، أن معدل الجرعة الممتصة من الجسيمات مباشرة التأين عند سطح البحر عند خط عرض متوسط، يبلغ ٣٢ نانو غراي/ساعة، وذلك خارج أي مبنى أو درع. وحيث أن المعامل المرجح للميونات وهي المكون الرئيس للأشعة الكونية عند سطح الأرض يساوي ١ ، يصبح هذا الرقم الأخير هو ذاته معدل الجرعة الفعالة من المركبة المشحونة للأشعة الكونية عند سطح البحر في الهواء الطلق (أي خارج المباني) عند خط عرض متوسط.

وأما معدل الجرعة الفعالة من النيوترونات عند مستوى سطح البحر وعند خط عرض متوسط فتقدره اللجنة العلمية للأمم المتحدة بحوالي ٢,٤ نانو سيفرت/ساعة. ويزيد هذا المعدل زيادة سريعة كلما زاد الارتفاع (شكل ٥-٢).


معدل الجرعة
٥٠٠٠
١٠٠٠
٥٠٠
٢٠٠
١٠٠
٥٠
(أ)
(ب)
أ ـ خط عرض أكبر
ب ـ خط عرض أقل
٣
٩
١٥
الارتفاع عن سطح البحر (كم)

شكل ٥–١


معدل الجرعة
١٠٠٠
١٠٠
١٠
١
٥
١٠
١٥
الارتفاع عن سطح البحر (كم)

شكل ٥–٢

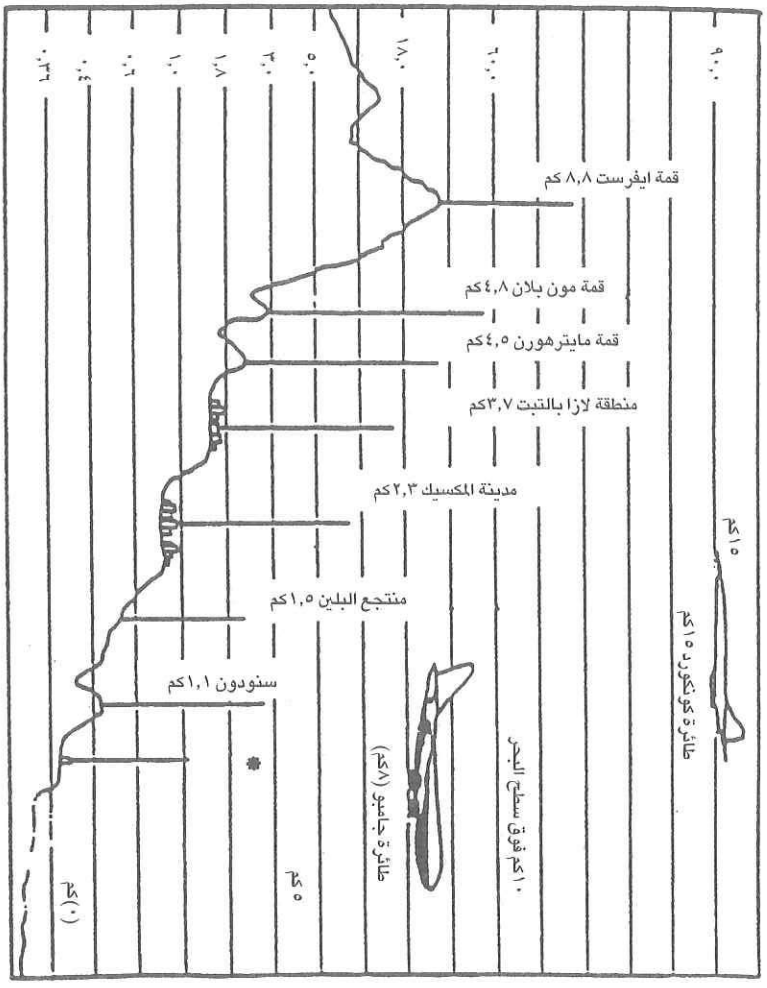
وبالنسبة لخطوط العرض فقد ورد أن المجال المغنطيسي الأرضي يحرف الجسيمات المشحونة الواردة من المجرات أو من الشمس بعيداً عن خط الاستواء في اتجاه القطبين. لذلك، يكون معدل التعرض للأشعة الكونية أقل ما يمكن عند خط الاستواء في حين يتزايد تدريجياً كلما ابتعدنا عن هذا الخط نحو أي من القطبين ويصل معدل التعرض أقصى قيمة له عند أي من القطبين.

كذلك، يلعب المبنى الذي يعيش أو يعمل فيه الإنسان دوراً هاماً كدرع واق من الأشعة الكونية. إلا أن حساب هذا الدور يصعب كثيراً نظراً لتفاوت نوعيات المواد التي تصنع منها المباني وارتفاعاتها.

وهكذا، تقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن الإنسان يتعرض لجرعة سنوية من الأشعة الكونية تتراوح بين حوالي ٠,٢٥ مللي سيفرت/سنة، وحوالي ٢,٠ مللي سيفرت/سنة، تبعاً لارتفاع المدينة التي يقطنها عن سطح البحر وموقعها من حيث خط العرض ونوع المباني التي يعيش الإنسان داخلها. كذلك، تعتبر اللجنة العلمية أن المتوسط الموزون بالنسبة لسكان العالم أجمع يبلغ ٠,٣٦ مللي سيفرت/سنة.

ويسهم السفر بالطائرات في زيادة الجرعة التي يتلقاها أعضاء أطقم الطائرات والمسافرون زيادة هائلة خاصة في الطيران الأسرع من الصوت الذي يطير على ارتفاع ١٥كم. في المتوسط. فعند الطيران على ارتفاع حوالي ١٠-١١كم (ارتفاع الطائرات النفاثة العادية) يزيد معدل الجرعة على المعدل الموجود على سطح الأرض بما لا يقل عن ٢٥ ضعفاً ويزيد هذا المعدل كثيراً عند الطيران على ارتفاع ١٥كم. ويبين شكل (٥-٣) كيفية تغير معدل الجرعة الفعالة السنوي كدالة من الارتفاع لبعض الأماكن في العالم وخلال رحلات الطيران، على ارتفاعات مختلفة.

معدل الجرعة (مللي سيفرت/سنة)



شكل ٥-٣

٥-٥-٣ الأشعة الأرضية الطبيعية

لا يتعرض الإنسان للأشعة الخطرة الواردة من السماء فحسب، وإنما يتعرض كذلك في المتوسط لجرعة إشعاع أكبر منها ترد إليه من الأرض. فالقشرة الأرضية السطحية تتضمن كميات من المواد المشعة منذ خلق المولى، عز وجل، هذه الأرض، لتميز هذه المواد بأعمار نصفية طويلة للغاية. ومن النظائر الأساسية المشعة الموجودة طبيعياً في الأرض حتى الآن نظائر سلسلة اليورانيوم ٢٣٨ المشعة، التي تبدأ بنظير اليورانيوم ٢٣٨، الذي يتميز بعمر نصفي يبلغ حوالي ٤,٤٧ مليار سنة، ويتفكك حتى يصل إلى نظير الرصاص ٢٠٦ المستقر، عبر ١٤ مرحلة من مراحل التفكك، ٨ منها هي تفككات ألفا، وستة منها تفككات بيتا. وترافق بعض هذه التفككات انطلاق أشعة جاما. كذلك، توجد سلسلة مشعة أخرى تسهم بقدر ملموس في التعرض البشري هي سلسلة الثوريوم ٢٣٢، الذي يتميز بعمر نصفي يبلغ حوالي ١٤ مليار سنة والذي يخضع بدوره لعدد مماثل تقريباً من تفككات ألفا وبيتا واضمحلال جاما وصولاً إلى الرصاص ٢٠٨ المستقر. وفضلاً عن ذلك يوجد في القشرة الأرضية نظير البوتاسيوم ٤٠ المشع ذو العمر النصفي ١,٢٨ مليار سنة، الذي يتفكك عبر تفكك بيتا وينطلق عن ذلك جسيمات بيتا وإشعاعات جاما. وفضلاً عن هاتين السلسلتين ونظير البوتاسيوم ٤٠ توجد سلسلة أخرى وبعض النظائر طويلة العمر في القشرة الأرضية، إلا أن إسهامها في جرعة التعرض البشري محدود. وهذه السلسلة هي سلسلة الاكتينيوم التي تبدأ بنظير اليورانيوم ٢٣٥ ذي الوفرة المحدودة للغاية، (التي لا تتجاوز ٠,٧٢٪ بالمقارنة باليورانيوم ٢٣٨)، والذي يتفكك بعمر نصفي مقداره ٠,٧١ مليار سنة عبر عدد من تفككات ألفا وبيتا مع انطلاق أشعة جاما، إلى أن يصل للرصاص ٢٠٧ المستقر. ومن النظائر المشعة الأخرى الموجودة طبيعياً في التربة الروبيديوم ٨٧ ذو العمر النصفي الذي يقترب من ٤٧ مليار سنة.

كذلك توجد المواد (النويدات) المشعة الطبيعية في عناصر البيئة من حولنا كالهواء والماء والكائنات الحية بدرجات منخفضة. بذلك، يتعرض الإنسان خارجياً للإشعاعات التي تنطلق من هذه المواد وتحديداً لجسيمات بيتا وإشعاعات جاما المنطلقة من التربة أساساً.

وتتوفر في الوقت الحالي معلومات كاملة حول مستويات التعرض للأشعة المنطلقة من الأرض في كافة بقاع العالم وحول معدل التعرض من هذه الأشعة على

ارتفاع متر واحد من سطح الأرض، حيث اعتمد هذا الارتفاع لكونه يمثل ارتفاع معظم الأعضاء البشرية الحساسة عند وقوف الإنسان على الأرض أو حتى عند رقوده على الأسرّة المختلفة. وقد أوضحت الدراسات المتكاملة حول مستويات تركيز المواد المشعة في التربة أن هذه المستويات تتفاوت تفاوتاً هائلاً تبعاً لنوع التربة. فقد وجدت مستويات تعرّض تزيد زيادة هائلة عن المتوسطات العالمية في بعض البقاع في البرازيل والهند وإيران والنيجر ونيجيريا وغيرها. ويبين جدول (٥-٣) حدود تركيزات بعض المواد المشعة والقيم المتوسطة لهذه التركيزات في العالم. وإن كانت التركيزات تزيد زيادة هائلة عن القيم الواردة في هذا الجدول بالنسبة لعدد من المواقع في العالم بما فيها تلك المذكورة في الجملة السابقة.

ويتراوح معدل الجرعة الممتصة من الأشعة الأرضية، التي يتعرض لها الإنسان، على ارتفاع متر واحد من سطح الأرض في المناطق المختلفة عادية المستوى بين حوالي ٢٤ وحتى ٨٥ نانوغراي/ساعة، بقيمة متوسطة تبلغ حوالي ٥٣ نانوغراي/ساعة. أما المتوسط الموزون من حيث كثافة السكان في العالم فيصل إلى حوالي ٥٨ نانوغراي/ساعة. بذلك، يمثل معدل الجرعة الفعالة المتوسطة في العالم للفرد الواحد ٠,٤٦٧ مللي سيفرت/سنة وحوالي ٠,٥ مللي سيفرت/سنة كمتوسط موزون.

السلسلة أو النظير	المتوسط العالمي		متوسط معدل الجرعة نانوغراي/ساعة
	الحدود	المتوسط العالمي	
بوتاسيوم ٤٠	١٠٠ ـ ٧٠٠	٣٧٠	١٥
سلسلة اليورانيوم ٢٣٨ والراديوم ٢٢٦	٤ ـ ١٤٠	٣٥	انظر الراديوم ٢٢٦
سلسلة الثوريوم ٢٣٢	٤ ـ ١٣٠	٣٥	٢٢
الراديوم ٢٢٦ ونواتجه	٨ ـ ١٦٠	٤٠	١٨

جدول (٥-٣): حدود التراكيز المتوسطة لبعض المواد المشعة الطبيعية ومتوسط معدل الجرعة الفعالة منها (التركيز بوحدة بكرل/كغم)

٤-٥-٥ غاز الرادون كمصدر رئيس للتعرض للأشعة

غاز الرادون هو غاز عديم الطعم واللون والرائحة وغير مرئي وتصل كثافته في الحالة النقية إلى حوالي ثمانية أضعاف كثافة الهواء. وللغاز الموجود في الهواء الجوي نظيران رئيسان هما: الرادون ٢٢٢ وينتج عن تفكك الراديوم ٢٢٦، أي أنه أحد نواتج تفكك سلسلة اليورانيوم - راديوم، والرادون ٢٢٠ الذي يتكون عن تفكك الراديوم ٢٢٤ الذي يعتبر أحد أعضاء سلسلة تفكك الثوريوم ٢٣٢. ويعتبر الرادون ٢٢٢ أهم من حيث المخاطر الإشعاعية بمقدار عشرين ضعفاً تقريباً بالمقارنة بالرادون ٢٢٠، وفي الحقيقة، فإن نواتج تفكك الرادون ٢٢٢ مثل الرصاص ٢١٤، والبسموت ٢١٤، والبولونيوم ٢١٤، والبولونيوم ٢١٠، والرصاص ٢١٠ هي التي تسهم بالنصيب الأعظم من مخاطر الرادون بالمقارنة بالغاز نفسه، حيث أن هذا الغاز يعتبر من الغازات الخاملة كيميائياً ويدخل إلى الرئتين مع هواء التنفس فيترك فيهما نويدانة الوليدة بدءا من البولونيوم ٢١٨ وما بعدها.

وينبثق غاز الرادون من التربة ومن جدران المباني والأرضيات خاصة إذا كانت هذه المباني والأرضيات متضمنة تركيزات عالية من الراديوم ٢٢٦ والراديوم ٢٢٤، ويتفاوت مستوى تركيز غاز الرادون في الهواء الطلق (أي خارج المباني) من مكان لآخر وفقاً لتركيز نظير الراديوم ٢٢٦ في تربة هذا المكان، ويعتبر تركيز الغاز الذي يبلغ حوالي ٥ - ١٠ بكرل/م٣ في الهواء الطلق من التراكيز المنخفضة نسبياً. كذلك، يزيد تركيز غاز الرادون في الهواء زيادة هائلة (تبلغ آلاف الأضعاف) عند وقوع هزات أرضية أو زلازل لانبثاق كميات هائلة من هذا الغاز من تحت القشرة الأرضية.

ويزيد تركيز الرادون داخل الأماكن المغلقة زيادة هائلة إلى عشرات بل وربما مئات الأضعاف بالمقارنة بتركيزه في الهواء الطلق، سواء بسبب الغاز المنبثق من أرضية المبنى أو المنطلق من الجدران التي تتضمن تركيزات ولو صغيرة من الراديوم ٢٢٦، الموجود في جميع أنواع التربة تقريباً. ويزيد تركيز الغاز داخل المبنى كلما زادت نسبة الراديوم ٢٢٦ في التربة المقام عليها المبنى أو في مواد البناء التي صنع منها. وتميل تراكيز الرادون إلى الانخفاض في الطوابق العلوية من المبنى بالمقارنة بالطوابق السفلية.

ويعتبر الماء المستمد من المصادر الجوفية والغاز الطبيعي المستخدم في توليد الطاقة في المنازل من أهم مصادر زيادة تركيز الرادون في المنازل خاصة في الحمامات والمطابخ. ويمكن أن يصل تركيز غاز الرادون في الغرف المختلفة إلى حدود قد تبلغ آلاف بل وعشرات الآلاف من البكرل/م٣ وفقاً لنوع التربة. كما يمكن أن تصل تركيزات هذا الغاز في المطابخ والحمامات إلى مستويات أعلى بسبب استخدام بعض أنواع المياه الجوفية أو الغاز الطبيعي الغني بالرادون في التسخين أو الطهي.

وقد اكتسب غاز الرادون أهمية كمساهم أعظم في التعرض البشري للإشعاع الموجود طبيعيا في البيئة، وذلك في السنوات الأخيرة، بعد أن تبين من تقارير الدراسات والبيانات التي أصدرتها اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن هذا الغاز يسهم بمفرده في تعرض أي فرد في العالم، لجرعة فعالة متوسطة مقدارها ١,٢ مللي سيفرت/ سنة، أي ما يزيد على المعدل الذي يتعرض له الإنسان من جرعات من كل من الأشعة الكونية والأرضية.

إن التخلص من مخاطر الرادون أمر يسير للغاية حيث أن تهوية المنزل تهوية جيدة ومستمرة تمثل أهم وسيلة لعدم التعرض لتركيزات عالية من الرادون. ولعل هذا أمر يسير للغاية خاصة في المناطق التي تتمتع بمناخ معتدل حيث يمكن أن تخلّص التهوية الإنسان من نسبة كبيرة من التعرض لجرعة الرادون. إلا أن الأمر يعتبر عسيراً في المناطق الباردة نظراً للحاجة إلى المحافظة على الطاقة المستخدمة في تدفئة هواء المنازل. كذلك، يعتبر الأمر عسير نسبياً في الأماكن شديدة الحرارة التي تستخدم فيها مكيفات الهواء لتبريد هواء المنازل، حيث أن محاولة الاحتفاظ بالهواء البارد وعدم استبداله بهواء جديد من خارج المنزل يؤدي إلى زيادة تركيز الغاز بدرجة فائقة في المنزل. ويبين شكل (٥-٥) نتائج التجارب العملية التي أجريت على بعض المساكن حول كيفية تغير تركيز غاز الرادون داخل المنزل من لحظة غلق كل من النوافذ والأبواب.

وهكذا، يمكن أن يتخلص الشخص الموجود داخل مكان مغلق من النسبة العظمى من المتوسط العالمي للتعرض الإشعاعي لغاز الرادون بمجرد توفير تهوية جيدة ومستمرة للمنزل، كما يمكن أن يضاعف معدل التعرض فوق هذا المتوسط لعدة أضعاف بغلق الأبواب والنوافذ وعدم تجديد الهواء داخل منزله.

وفضلاً عن الأشعة الكونية والأشعة المنبعثة من الأرض وغاز الرادون تكتنف الأشعة حياتنا من بعض المصادر الطبيعية الأخرى، وإن ضعف إسهام هذه المصادر في التعرض البشري للأشعة المؤينة. فالفحم الحجري، مثلاً ،يحتوي على قدر ضئيل من المواد المشعة التي تحترق مع هذا الفحم وتتسرب النويدات المشعة إلى البيئة، إما مع غازات المداخن أو مع الرماد المتخلف عن الاحتراق والذي يستخدم أحياناً لأغراض زراعية. وتتسبب المداخن في تعريض الناس للإشعاع المؤين مباشرة بينما يتساقط جزء على الأرض ويستقر مع الرماد في البيئة ويمكن أن يصل إلى المحاصيل الزراعية التي تغذي الإنسان والحيوان. كذلك، يؤدي الطهي باستخدام الفحم في المنازل إلى جرعة فعالة جماعية تتراوح بين حوالي ٢٠٠٠ ، ٤٠٠٠ فرد.سيفرت على مستوى العالم. كذلك تعتبر الطاقة الجيوفيزيائية (طاقة باطن الأرض) أحد مصادر الإشعاع المتزايد. وقد أوضحت الدراسات وجود انبعاثات للمواد المشعة من أماكن استغلال هذه الطاقة تسهم بقدر ضئيل في التعرض البشري للأشعة.

كذلك، يستخرج الفوسفات من أماكن كثيرة في العالم بما فيها عدد كبير من الدول العربية. ويحتوي خام الفوسفات المستخرج من أماكن كثيرة في العالم ،عادة، على تركيزات عالية من اليورانيوم وينبعث غاز الرادون المشع أثناء عمليات استخراج ومعالجة هذا الخام. وبعض المخصبات الزراعية تتضمن مواد مشعة ويمكن أن تلوث التربة والأطعمة التي نتناولها، خاصة لو استخدمت المخصبات في صورة سائلة أو عند تقديم هذه المواد الملوثة كغذاء للحيوانات المدرة للألبان، حيث ترفع مستويات الراديوم في اللبن. وتسهم صناعة الفوسفات في العالم بما يعادل ١٠٠٠٠ فرد. سيفرت من الجرعة الفعالة الجماعية في السنة الواحدة.

٦-٥ بعض المصادر الصنعية للأشعة المؤينة

تمكن الإنسان من استخدام قوة الذرة في مجموعة عريضة من الأغراض، بدءاً من الطب والصناعة وانتهاء بالأسلحة، ومن إنتاج الطاقة الكهربائية إلى الكشف عن الحرائق، ومن الساعات المضيئة إلى البحث عن الخامات والفلزات. وتسهم جميع هذه العمليات في تعريض الإنسان لجرعات متزايدة من الأشعة المؤينة، سواء للأفراد الممارسين لهذه النشاطات أو لعامة البشر.

وتتفاوت الجرعات الإشعاعية الفردية الناجمة عن المصادر الصنعية تفاوتاً هائلاً، حيث يتلقى معظم الناس كميات صغيرة نسبياً من الأشعة من المصادر الصنعية في حين يتلقى قلة منهم كمية هائلة من هذه الأشعة الصنعية تفوق الجرعات التي يحصلون عليها من مصادر التعرض الطبيعي بعشرات المرات. ومع أن التحكم في التعرض للأشعة من المصادر الصنعية أبسط بكثير من التحكم في التعرض للأشعة من المصادر الطبيعية، إلا أن التعرض الخارجي للأشعة من التفجيرات السابقة للأسلحة النووية ومن بعض المصادر الأخرى غير خاضع لأي تحكم إلا منع إجراء هذه التفجيرات.

وفي الوقت الحالي تعتبر المصادر الطبية من أهم مصادر التعرض البشري للأشعة المؤينة في شتى بقاع العالم المتقدم والنامي. وتعتبر الأشعة السينية التشخيصية من أعظم مصادر التعرض الإشعاعي في العالم. فعلى مستوى العالم يجري تنفيذ ما لا يقل عن ١٥٠٠ مليون فحص بالأشعة السينية سنوياً. ويبين جدول (٥-٤) متوسط الجرعات الناتجة عن فحوص الأشعة السينية على بعض أعضاء وأجهزة الجسم في بعض دول العالم .

البيان	الدولة					
	الصين	فرنسا	إيطاليا	اليابان	روسيا	الولايات المتحدة
الجمجمة	—	١,٤	٠,٢٢	٠,٠٩	٠,١٧	٠,١٣
العمود الفقري	—	١,٤	٠,١٤	٠,٣	٠,٢٣	٠,٢٠
الصدر	٠,٢١	٠,٢٨	٠,١٨	٠,٠٥	٠,٣٦	٠,٠٧
البطن	٠	٢,٦	١,٩	٠,٢٩	١,٥	٠,٥٦
الجهاز البولي	٤,٥	١٠,٤	٧,١	٠,٧٠	٢,٥	١,٦
الحوض والفخذ	—	١,٦	٣,٢	١,٩٥	١,٥٠	٠,٦

جدول (٥-٤): مقدار الجرعة في الفحص الواحد بالملي سيفرت

وقد يترتب على بعض فحوص الأشعة السينية مخاطر وراثية على الأبناء والأحفاد عند تعرض الأعضاء التناسلية لأحد الأبوين لجرعة معينة، تسمى عندئذ بالجرعة المؤثرة وراثياً Genetically Significant Dose وتتوقف قيمة هذه الجرعة بدرجة رئيسة على عاملين؛ الأول هو سن المتعرض وما إذا كان من المحتمل أن ينجب أطفالاً بعد حصوله على الجرعة، والثاني هو قيمة الجرعة التي تودعها الأشعة السينية في الخلايا التناسلية. ومن الدراسات التي تمت في الدول المتقدمة تبين أن الإسهام الأكبر في الجرعة المؤثرة وراثياً ينتج عن فحوص الحوض وأسفل الظهر والجزء العلوي من عظم الفخذ ومفصل الفخذ، والمثانة ومجرى البول وحقنة الباريوم الشرجية.

وقد أمكن تحديد قيم الجرعات الإشعاعية المؤثرة وراثياً في عدد من دول العالم المتقدم وتبين أن هذه الجرعة تقع بين حوالي ٠,٢٢ – ٠,٥٠ مللي سيفرت للشخص الواحد.

كذلك، تستخدم العديد من النظائر المشعة لتشخيص العديد من الأمراض خاصة الأورام السرطانية. وقد تزايد استخدام هذه النظائر على مدى العشرين سنة الأخيرة. فضلاً عن ذلك، يوجد حالياً في العالم ما يربو على ١٨٠٠٠ جهاز للعلاج بالأشعة تعالج حوالي خمسة ملايين مريض سنوياً بتعريض الأنسجة المصابة بالسرطان لإشعاعات مركزه لقتل خلايا الورم. ورغم محاولات المنظمات الدولية لتقويم الجرعات الجماعية الناتجة عن هذا الاستخدام إلا أنه لا توجد حتى الآن سوى معلومات قليلة حول الموضوع لعدة أسباب، منها عدم التسجيل الدقيق للبيانات والمتعرضين، وحدوث أخطاء كبيرة في قيم الجرعات المودعة في كل تعرض.

وعموماً، فإن البيانات المتوفرة للجنة العلمية للأمم المتحدة تبين أن مجموع جرعات فحوص الأشعة السينية يمثل ما بين ٩٠ حتى ٩٥٪ من الجرعة الإجمالية التي تسببها التعرضات الطبية (أي التعرضات لأغراض التشخيص والعلاج)، وذلك في الدول المتقدمة. وقدرت اللجنة مقدار الجرعة الفعالة السنوية المتوسطة للفرد الواحد، في هذه الدول، بحوالي ١ مللي سيفرت (أي حوالي نصف الجرعة الفعالة من المصادر الطبيعية). ويتضمن هذا الرقم الأخير تراوحاً كبيرا من دولة لأخرى ضمن الدول المتقدمة، يصل إلى حوالي ثلاثة أضعاف.

وترى اللجنة العلمية أنه رغم أن تقديرات الجرعة الفعالة الفردية السنوية من التعرضات الطبية، على مستوى العالم، تقدر بحوالي ٠,٤ مللي سيفرت/ سنة للفرد الواحد في المتوسط، إلا أنه يوجد اعتقاد شبه مؤكد أن هذا الرقم شديد الانخفاض. وهذا الانخفاض يعود إلى انخفاض عدد فحوص الأشعة السينية للفرد الواحد في الدول النامية، بالمقارنة بالدول الصناعية. فقد أوضحت الدراسات العملية أن الفرد يحصل في الفحص الواحد في الدول النامية على جرعة تزيد بمقدار يتراوح من عشرة إلى عشرين ضعفاً، بالمقارنة بالجرعة التي يحصل عليها الفرد لنفس الفحص في الدول المتقدمة. ويعود السبب في ذلك إلى وجود عيوب كبيرة في الأجهزة المستخدمة في الدول النامية، بسبب نقص الصيانة والخبرة وعدم خضوع الأجهزة للتفتيش والمراقبة وعدم توفر أنظمة وفنيين لمراقبة هذه التعرضات.

إن كثيراً من أطباء الأشعة في الدول النامية لا يكترثون كثيراً بنوعية الجهاز المستخدم ولا ينفذون الفحوص الدورية الواجبة عليه. فضلاً عن ذلك، لا يتردد هؤلاء الأطباء في تكرار الصورة أكثر من مرة وتعريض المريض لجرعات هائلة دون مبرر ودون رقابة لاعتقادهم الخاطئ بأن هذه الأشعة غير خطيرة (كما يردد البعض).

وتجدر الإشارة إلى أن المنظمات الدولية المعنية بالوقاية من الإشعاعات المؤينة توصي بعدم إجراء فحوص بالأشعة السينية، ما لم يوجد مبرر قوي لها خاصة بالنسبة للأطفال وصغار السن والنساء الحوامل. وعند الضرورة لإجرائها يجب أن يقيد هذا الإجراء بحيث يخفض عدد اللقطات للتشخيص الواحد للحد الأدنى، وتضبط ظروف تشغيل الجهاز،واستخدام أفلام بحساسية مناسبة للحصول على الصورة المناسبة مع إيداع أقل جرعة ممكنة في المريض.

وهكذا خلصت المنظمات الدولية المعنية بالوقاية من أخطار الأشعة المؤينة أن الأشعة السينية تسهم بالقدر الأعظم من معدل الجرعة الفعالة الجماعية السنوية على مستوى العالم وأنها (أي الأشعة السينية) تمثل المصدر الثاني مباشرة بعد تعرض البشر للإشعاعات المؤينة الموجودة طبيعياً في البيئة .

ومن مصادر التعرض الصنعي للأشعة المؤينة تلك الأشعة التي تنبعث عن المواد المشعة التي ترسبت على سطح الأرض جراء تحارب التفجيرات النووية التي حدثت فوق سطح الأرض، خاصة عندما بلغت هذه التجارب ذروتها بين عامي ١٩٥٤،

١٩٥٥م في الفترة الأولى ثم بين عامي ١٩٦١ حتى ١٩٦٢ في الفترة الثانية. وقد كان لارتفاع مستوى تلوث سطح الأرض في نصف الكرة الشمالي بالمواد المشعة الأثر الذي دفع دول النادي النووي لتوقيع اتفاقية حظر إجراء تجارب التفجيرات النووية في الجو والمحيطات والفضاء الخارجي. وقد نتج عن تفجيرات هاتين الفترتين وعن بعض التجارب التي تمت بعد ذلك في الجو بواسطة بعض الدول التي لم توقع على اتفاقية حظر إجراء التجارب في الجو عن ترسب عشرات من النظائر المشعة المختلفة على سطح الأرض خاصة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية. وتتميز بعض النظائر المترسبة والناتجة عن هذه التفجيرات بعمر نصفي طويل يبلغ عدة عشرات ومئات السنين. ومن أهم هذه النظائر وأخطرها نظائر السيزيوم ١٣٧ والاسترونشيوم ٩٠ والبلوتونيوم ٢٣٩، وتقدر الجرعة الفعالة الجماعية للبشر على مستوى العالم بحوالي ٣٠ مليون فرد.سيفرت، وصل منها للبشرية بالفعل حوالي من ١٨-٢٠٪ حتى عام ٢٠٠٠، وسيصل الباقي (أي حوالي ٨٠٪) إلى البشرية خلال مئات بل آلاف السنين القادمة.

وفضلاً عن ذلك، فإن منشآت دورة الوقود النووي بما فيها عمليات استخراج اليورانيوم من الأرض وطحنه في مطاحن مكشوفة، ومعالجة خاماته وتحويلها لوقود نووي، وتشغيل مفاعلات القوى النووية وحوادثها، وإعادة معالجة الوقود النووي بعد استهلاكه في المفاعلات، والتخلص من النفايات المشعة المتولدة عن دورة الوقود النووي، تسهم جميعها بجرعة فعالة جماعية سنوية تقدر بحوالي ٨٠٠ فرد. سيفرت. ويبين جدول (٥-٥) إسهام مصادر الأشعة المختلفة الطبيعية والصنعية في الجرعة الفعالة الجماعية على مستوى العالم وفقاً لتقديرات اللجنة العلمية للأمم المتحدة.

ولتقدير حجم المخاطر المترتبة عن هذه الجرعات يمكن بيسر حساب عدد الحالات السرطانية القاتلة المترتبة على أي منها، بحساب الجرعة الفعالة الجماعية على مستوي العالم، وضرب مقدار هذه الجرعة في معامل الخطورة الذي تتراوح قيمته بين حوالي $٤,٥ \times ١٠^{-٢}$ وحتى $٨,٥ \times ١٠^{-٢}$ لكل فرد.سيفرت، وبقيمة متوسطة تبلغ حوالي $٥,٥ \times ١٠^{-٢}$. وكمثال على ذلك، فإنه بفرض أن الجرعة الفعالة الجماعية الناتجة عن

فحوص الأشعة السينية، في العالم أجمع، تبلغ حوالي ٣ مليون فرد.سيفرت سنوياً، يسهل حساب عدد حالات السرطانات القاتلة المترتبة عن هذه الجرعة السنوية في العالم كالآتي: ٣٠٠٠٠٠٠ × ٠,٠٥٥ = ١٦٥٠٠٠ إصابة سرطانية سنوياً بين سكان العالم بسبب هذه الأشعة.

المصدر	معدل الجرعة الفعالة السنوية للفرد	الجرعة الفعالة الجماعية السنوية
المصادر الطبيعية		
الأشعة الكونية	٠,٣٦ مللي سيفرت	
الأشعة الأرضية	٠,٤٦ مللي سيفرت	
نويدات داخل جسم الإنسان	٠,٣٠ مللي سيفرت	٤٠٠٠ فرد.سيفرت/سنة
السفر جوا		
رادون	١,٢٠ مللي سيفرت	
المصادر الصنعية		
الأشعة السينية الطبية		٢–٥ مليون فرد.سيفرت/سنة
التفجيرات النووية		٣٠٠٠٠٠٠ فرد.سيفرت
الساعات بالميناء المضيئة		٢٠٠٠ فرد. سيفرت/سنة
القوى النووية		٨٠٠ فرد. سيفرت/سنة

جدول (٥–٥): إسهام مصادر الأشعة المختلفة في التعرض البشري

وقد تثير الفقرات السابقة نوعا من الخوف في نفوس القراء، إلا أن هذا الخوف ليس له مايبرره. فقد حظيت الوقاية من أخطار الأشعة المؤينة، في الوقت الحالي، بأعلى درجات الاهتمام، سواء على المستوى الدولي أو على المستويات الوطنية، نظرا للرعب النووي الذي ترسخ في أذهان البشر، ولأن الغالبية العظمى من أعضاء الرعيل الأول من العلماء التجريبيين الذين ساهموا في تطوير العلوم النووية قد قضوا بالسرطان الناتج عن التعرض المفرط لهذه الأشعة، دون إدراك لمخاطرها في حينه. لذلك، تطور غالبية الدول نظما وطنية للوقاية من أخطار الأشعة المؤينة لخفض التعرض لهذه الأشعة، وبالتالي لخفض مخاطرها دون الحد من تطبيقاتها المفيدة.

ولبث الطمأنينة في النفوس ينبغي الإشارة إلى أنه بفرض بقاء متوسط التعرض السنوي للشخص الواحد من فحوص الأشعة السينية في حدود ١ مللي سيفرت، وبفرض امتداد عمر مجموعة من الأشخاص حتى ٧٠ عاما، فإن معدل المهددين بالموت بالسرطان الناتج عن هذه الفحوص بين هذه المجموعة لايتجاوز أربعة أشخاص من بين كل ألف شخص. وهذا معدل ضئيل للغاية بالمقارنة بمعدل الوفيات السرطانية الناتجة طبيعيا، والتي تبلغ مائتين لكل ألف وفاة.

وعموما، يمكن للإنسان الواعي أن يقلل من الجرعة الفعالة التي يتعرض لها سنويا بشكل طبيعي، أو تلك الناتجة عن المصادر الصنعية كفحوص الأشعة السينية، إلى حوالي النصف وذلك بالابتعاد عن الأماكن سيئة التهوية للتخلص من معدل جرعة كبيرة من الرادون، ومن خلال خفض تعرضاته من الأشعة السينية للحد الأدنى، برفض الفحوص المتكررة بالأشعة السينية، إلا للضرورة.