المبحث الثالث

تطبيقات تقنية النانو في التشخيص الطبي

يساهم التشخيص الطبي في الاكتشاف المبكر للمرض، مما يجعل عملية العلاج أكثر نجاحًا وأقل تكلفة، كما أنه يريح المريض نفسيًّا من متابعة العلاج لفترة طويلة. والآمال معقودة على دور تقنية النانو في تطور عملية التشخيص وقدرة الأطباء على معرفة أسباب الأمراض وطرق حدوثها مبكرًا؛ وهو ما سينعكس بصورة إيجابية على حياة الإنسان وتقدم المجتمعات.

يتم في التطبيقات الطبية لتقنية النانو تحضير الجسيمات متناهية الصغر، والأجهزة المعتمدة عليها؛ بحيث تتخاطب وتتفاعل مع الأنسجة والخلايا الحية على المستوى الجزيئي، وليس على مستوى الخلايا بدقة عالية وتحكم وظيفي، مما يساعد في دفع عجلة التطور في تقنيات الأنظمة الحيوية، وتصبح الاختبارات الحيوية لقياس وجود أو نشاط المواد المختبرة أسرع و أكثر دقة[1].

(1) Dynan.W, ETALL:Understanding & reengineering nucleoprotein machines to care human disease. J. nanomedecine. Feb.vol 2008:3–no:1.

ويمكن دمج جزيئات النانو المغناطيسية مع الأجسام المضادة المناسبة، واستخدامها كعلامات على وجود جزيئات محددة أو ميكروبات، وبالمثل استخدام جزيئات الذهب المدمجة مع مقاطع صغيرة من الحمض النووي، للتعرف على تسلسل الجينات في عينة ما. هناك أيضًا تقنية ثقوب النانو لتحليل الحمض النووي، التي تحول تسلسل وحداته مباشرة إلى إشارة كهربائية.

وفي خطوة جريئة تبشر بتطوير طرق حديثة لتشخيص العديد من الأمراض، مثل الكبد والقلب والسرطان، مما يمهد للكشف عن إيجاد علاج مناسب يوقف انتشارها، أظهرت دراسة أمريكية حديثة أجريت علي الحيوانات، أن استخدام «النانو تيوب» أو الأنابيب الفائقة الدقة الكربونية في الأنسجة الحية، ليس له آثار سلبية مباشرة علي صحة الفرد.

وتتميز تلك الأنابيب الفائقة الدقة بخصائصها الكيميائية والضوئية الفريدة، فباستطاعتها أن تشع موجات ضوئية بطول موجي محدد، لذا فهي تجتذب اهتمام الكثير من الباحثين في مجال الطب الحيوي، حيث يتوقع أن تساهم في تحقيق إنجازات مميزة في المجالين التشخيصي والعلاجي.

ويتكون هذا النوع من الأنابيب الفائقة الدقة أو ما يسمي Nanotube من مادة الكربون النقية، وهي تأخذ شكل أسطوانات مفرغة يصل قطر الواحد منها إلي واحد نانوميتر، أي واحد من مليون جزء من المليمتر، وهو ما يعادل عرض جديلة واحدة من جدائل الحمض النووي DNA.

وكان فريق ضم باحثين من جامعة رايس ومركز آي. دي. أندرسون للسرطان التابع لجامعة تكساس الأمريكية، أجري دراسة بهدف رصد تأثير استخدام أنابيب Nanotube الكربونية، على أجسام الكائنات الحية، حيث تضمنت تجارب تعد الأولى من نوعها، والتي تتبع الباحثون من خلالها مسار تلك الأنابيب المجهرية في أجسام الحيوانات، من خلال فحص نسيج العضو الذي يتوقع أن تستقر فيه.

وبالبحث تبين أن الأنابيب قد استقرت في النسيج الكبدي بعد ساعة من حقن الحيوان بها، كما تبين أن بعض تلك الأنابيب قد ترسب في أجزاء من النسيج الكلوي، وهو ما توقعه الباحثون حيث يعد هذان العضوان مصفاة للدم.

ويمكن تلخيص التقدم في التشخيص الطبي الذي ستساهم فيه تقنية النانو في محاور عدة، منها:

أجهزة التشخيص (Diagnostic Instruments)

يمكن لأجهزة التشخيص أن تستفيد من التقدم في تطبيقات النانو في مجال الإلكترونات، ومعالجة الإشارات، وأجهزة الحاسب لتحليل البيانات، مما يساهم في سرعة أدائها ودقة تشخيصها، واكتشافها للمرض بصورة مبكرة.

وتشمل أجهزة التشخيص ما يلي:

أ. تقنيات التصوير (Imaging Techniques):

يعد التصوير الطبي بتقنياته المتعددة من المجالات التي ستساهم فيها تقنية النانو، حيث يتوقع أن تدفع عجلة التطور فيها من حيث كفاءة أدائها وسرعة عملها وزيادة سبل الأمان فيها، ذلك بسبب دخول تقنية النانو في صناعة الشرائح الإلكترونية، ودوائر التوصيل الكهربائي ومعالجات البيانات المستخدمة في تلك الأجهزة (**شكل 15**).

كما أنها ستساهم في تخفيض تكلفة صناعتها، ومن ثم انتشار استخدامها، حيث لا تتواجد تقنيات التصوير التي تستخدم فيها تقنية النانو حاليًا إلا في المستشفيات والمراكز الطبية الكبيرة. وتشمل تقنيات التصوير أجهزة مختلفة لها أسسها الفيزيائية والهندسية، واستخداماتها الخاصة بها في التشخيص، ومن تلك الأجهزة ما يلي:

1. التصوير بالرنين المغناطيسي:

وهو من أهم الاستخدامات الرئيسة التي يمكن تطويرها بتقنية النانو؛ حيث تساعد تلك التقنية في زيادة كفاءة الصور ثنائية وثلاثية الأبعاد، ويصبح التباين بين الأنسجة الطبيعية وغير الطبيعية واضحًا في مراحله الأولى، وسيكون لدى الطبيب معلومات وافية عن حالة المريض وأعراض المرض من دون الحاجة إلى التدخل الجراحي، ومن أهم المجالات التي يمكن أن تستفيد من هذه التقنية تشخيص أمراض الدماغ والمفاصل والظهر والأعصاب.

يتميز جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي بقدرته العالية على تصوير الأنسجة اللينة والتعرف على أنواع الأورام عن طريق عوامل مختلفة تؤثر في الإشارة المستقبلة من النسيج، حيث تتأثر قيم هذه العوامل بالوضع التركيبي والفسيولوجي في الأنسجة الطبيعية عنها في حالة تكون الأورام، إلا أن التمييز بين قيم العوامل في الأنسجة الطبيعية في حالة المرض خاصة في مراحله الأولية يشكل تحديًا كبيرًا، وهنا يأتي دور جسيمات النانو عمليًّا في الارتباط بمنطقة الورم عند إدخالها الجسم مع القدرة على التحكم في سيرها، والتأكد من وصولها إلى منطقة النسيج المتوقع انتشار المرض فيه، ومن ثم تأثيرها على قيم العوامل

المقاسة بالجهاز، مما يسهل تحديد منطقة الورم وحجمه ومدى انتشاره عند الحصول على الصور التشخيصية من الجهاز.

2. التصوير بالأشعة السينية:

يمكن الاستفادة من تقنية النانو في هذا النوع من التصوير في تطوير تشخيص أمراض العظام والثدي والصدر وإصابات الحوادث.

3. التصوير بالموجات فوق الصوتية:

يستخدم التصوير بالموجات فوق السمعية في تشخيص أمراض القلب ومتابعة نمو الجنين، ولذلك فإن تقنية النانو سوف تطور هذا النوع من التشخيص.

إن دراسة خلايا الجسم يكون صعبًا، ومن هنا يلجأ العلماء إلى تلوينها، وهناك مشكلة أخرى ألا وهي أن الخلايا التي تصدر أمواجًا ضوئية مختلفة في الطول لا تعمل بشكل واحد أو بكيفية واحدة على الدوام، الأمر الذي يجعل عمليات التصوير الطبي تواجه مشكلات على صعيد التشخيص الصحيح، وقد تمكن العلماء من حل هذه المشكلة باستخدام بعض جزئيات النانو التي تبدي ردود فعل مختلفة إزاء الترددات الموجية المختلفة الناشئة بطبيعة الحال عن اختلاف طول الموجة، وهو ما سيمكن الباحثين والأطباء من تعقب أي حركة تحدث في النسيج الحي

داخل جسم الإنسان، وفي مستطاع الأطباء هنا التعرف بدقة على حركة الدواء داخل النسيج المريض[1].

ب. الجسيمات متناهية الصغر (Nanoparticles):

وهي مواد نانوية لها خواص فيزيائية وهندسية متميزة، يمكن الاستفادة منها في تشخيص الأمراض، كمواد متباينة (Contrast agents)؛ بحيث ترفع درجة التباين بين الأنسجة ذات التركيب المختلف، ومن ثم يمكن تمييز التغيرات التركيبية والفسيولوجية باستخدام تقنيات التصوير المتعددة أو كمواد يمكن تتبعها Trace elements أو كمواد مميزة (Tagging and Labeling agents) للجزيئات الحيوية مثل البروتينات والإنزيمات، بحيث يسهل تتبع حركتها ودخولها إلى الخلايا وتفاعلها مع الجزيئات الأخرى، أو كمواد ملتصقة بمكان المرض، بحيث يتم اكتشاف مكان المرض بدقة عالية، ومن ثم تحديده كهدف للعلاج[2].

(1) Drexler KE, Peterson C, Pergamit G. Unbounding the future: The nanotechnology revolution. New York: William Morrow/Quill Books. 2009.

(2) Drexler KE.Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. Proc Natl Acad Sci USA 1981;78(9):5275–8. Available at:http://www. imm.org/PNAS.html.

ويمكن إنتاج هذه المواد وبخصائص متباينة بتغيرات بسيطة على سطحها لتهيئتها، لأن تؤدي وظائف مختلفة تساعد في التشخيص الأولي المبكر. وتوصف هذه الجسيمات بأنها متعددة الوظائف، فالجسم يعمل مثل الكبسولة يحمل بداخله مادة متباينة ذات طبيعة خاصة يمكن تتبعها باستخدام تقنيات التصوير الطبي. كما يعمل أيضًا كناقل للدواء يتم التحكم في الوقت والمكان المناسب لإطلاقه عن طريق الديناميكا الضوئية، بحيث يكون المركب حساسًا للضوء (أو لشعاع الليزر) عند تسليطه عليه، كما يحمل على سطحه مركبات حيوية لها القدرة على الارتباط الاختياري بالخلايا، بهذه الوظائف المختلفة، يوفر الجسيم قدرة عالية على استهداف الأورام وتتبع علاجها، ويقلل من تأثير الدواء على الأنسجة السليمة المجاورة للورم[1].

ج. الاختبارات الحيوية (Biochemical tests)

تستخدم الاختبارات الحيوية لتحديد وجود المرض ومسبباته، وهي من الأساسيات المهمة في تحديد التغيرات الفسيولوجية الوراثية المصاحبة للأمراض المختلفة، ويعوَّل

(1) Drexler KE, Peterson C, Pergamit G. Unbounding the future: The nanotechnology revolution. New York: William Morrow/Quill Books. 2009.

عليها في اكتشاف الأمراض وتشخيصها في وقت مبكر، وبربط الجزيئات الحيوية بجسيمات نانوية تصبح الاختبارات أكثر حساسية لأي تغير حيوي، وأكثر دقة في اكتشاف مسببات الأمراض وبشكل سريع، كما يتوقع أن تظهر اختبارات جديدة معتمدة على الخواص المميزة للأنظمة والجسيمات متناهية الصغر، ويتوقع أن تعتمد هذه الاختبارات على حجم عينة أقل مما هو مستخدم اليوم في المستشفيات والمعامل الحيوية.

إن طريقة جديدة لتشخيص تسمم الدم تعتمد على بطاقة في حجم بطاقة الائتمان بإمكانها أن تعطي نتائج لتحليل الدم في ساعة، ويعتمد هذا النظام على جسيمات النانو، التي تتحرك أوتوماتيكيًّا عن طريق قوى مغناطيسية.

فبالرغم من أن تسمم الدم يعد الثالث من الأمراض المميتة في ألمانيا، إلا أنه يستهان به، ففي هذه الدولة يموت سنويًّا حوالي 60.000 شخص معظمهم من تعفن الدم، وهذه النسبة توازي تقريبًا نسبة الموتى من النوبات القلبية. فقد أوضحت رابطة خبراء مرض تعفن الدم The Sepsis Nexus of Expertise أن المرضى الذين يصلون إلى غرفة العناية المركزة نسبة النجاة لديهم من هذا المرض تصل إلى 50% فقط، وأن أحد أسباب ارتفاع معدل الوفيات من

هذا المرض هو أن المرضى لا يعالجون بالشكل الصحيح، وذلك بسبب التأخر في تشخيص المرض، و ذلك لأن كلًّا من الطبيب والمريض عليهم الانتظار لأكثر من 48 ساعة للحصول على النتائج من المختبر.

أما في المستقبل، فهناك طريقة محمولة لتشخيص المرض، سريعة وأقل تكلفة، حيث يمكن تشخيص المرض حتى أثناء نقل المريض إلى المستشفى، و هذه الطريقة أطلق عليها MinoLab، وهي عبارة عن بطاقة بلاستيكية، حجمها حجم بطاقة ائتمان، يتم إدخالها في وحدة التحليل، التي هي أصغر من دفتر الملاحظات. وهذا النظام يحقق نتائج سريعة في أقل من ساعة، مما يمكّن الطبيب المعالج من وصف العلاج، وإنقاذ حياة المريض. وتعتمد هذه الطريقة على جسيمات ممغنطة تدخل إلى الخلايا المصابة في عينة الدم، وتسير بشكل أوتوماتيكي عن طريق تعرضها لقوى مغناطيسية، وفي نهاية العملية، فإن التشخيص يتم بواسطة مجسّات مغناطيسية[1].

الدكتور ديريك كوهليمير Dr. Dirk Kuhlmeier، عالم في معهد فراونهوفر لعلاج الخلية وعلم المناعة، فسّر كيف يتم كل

(1) إنقاذ الأرواح باختبار لمرض تعفن الدم: أمل باسم، مركز الترجمة العلمي http: / /physicsworld.com /cws /article .

ذلك قائلًا: «بعد أن يتم أخذ عينة الدم، فإن جسيمات نانوية تربط نفسها بالخلية المستهدفة في عينة الدم من خلال جزيئات ربط نوعية، ثم نقوم بتعريضها لمجال مغناطيسي بسيط، مما يؤدي إلى نقل الجسيمات إلى البطاقة البلاستيكية على طول مسببًا المرض، وتحركها من خلال تفاعلات دقيقة مختلفة خلال الثغرات الموجودة، حيث تتم سلسلة من تفاعلات البلمرة. وهذه الطريقة تقوم بنسخ جزيئات DNA ملايين المرات. بعد عملية النسخ فإن جسيمات النانو تنقل مسببات المرض في DNA إلى ثغرات الكشف، حيث يوجد نوع جديد من الرقائق الحيوية الممغنطة بإمكانها التعرف على مسببات المرض ومقاومات المضادات الحيوية».

وأضاف: «تبدأ جميع التفاعلات من عملية تحضير العينة مرورًا بعزل الجزيئات إلى عملية التوثيق بشكل أوتوماتيكي تام دون أي تدخل».

وهذا يعين أن عملية روتينية تتم بشكل أبسط بكثير من التحليل المختبري، وكذلك تقلل من خطر التلوث البكتيري الناجم عن البيئة، التي قد تعطي إنذارات خاطئة. وهناك ميزة أخرى كما أوضح دكتور ديريك كوهليمير:» لم توفر هذه الطريقة الوقت فحسب، بعملية اتحاد جسيمات النانو مع السائل الدقيق

micro-fluid. فالتصغير Miniaturization يعين أيضًا أن نوفر على أنفسنا أجهزة مختبرية باهظة الثمن»[1].

د. متابعة المرض:

ستساهم التقنيات الحديثة المعتمدة على النانو في تحليل العينات في وقت قصير وبحجم أقل، مما يمكن الطبيب من اتخاذ قراره في الوقت المناسب، وستوفر تقنيات التصوير المرتبطة بالجسيمات متناهية الصغر الفرصة لمتابعة تطور المرض (Monitoring)، ومراحل علاجه، كما هو الحال في علاج مرض السرطان بأنواعه المختلفة، حيث أظهرت بعض نتائج الدراسات الأولية في هذا الخصوص أهمية استخدام الجسيمات متناهية الصغر في توصيل الدواء إلى الأورام السرطانية، مع توفر القدرة في الوقت نفسه على متابعة قتل الخلايا السرطانية وانكماش الورم بدون تدخل جراحي من قبل الفريق الطبي.

هـ- مغانيط نانوية لتنقية الدم:

يعمل الباحثون في مدينة زيوريخ بسويسرا على تطوير مغانيط نانوية (شكل 16)، يمكنها أن تقوم في يوم من الأيام بسحب المواد الضارة من الدم. وقد تستخدم هذه التقنية لعلاج

(1) المرجع السابق نفسه.

الأشخاص الذين يعانون التسمم الدوائي، والتهابات مجرى الدم، وبعض أنواع السرطان[1].

يتكون المشروع من جسيمات نانوية ممغنطة مغلفة بالكربون، ومرصعة بأجسام مضادة للجزيئات، التي يرغب الباحثون في تطهير الدم منها، مثل البروتينات الالتهابية كالـ «إنترلوكن»، أو المعادن الضارة كالرصاص؛ حيث يستطيع الباحثون من خلال إضافة المغانيط النانوية للدم، ثم تمرير الدم في جهاز غسيل الكلى أو أي جهاز آخر مشابه، تصفية المركبات غير المرغوب فيها.

وتقول إنجي هيرمان، وهي المهندسة الكيميائية التي تترأس فريق البحث في جامعة زيوريخ موضحة: «إن المغانيط النانوية تقوم بالتقاط المواد المستهدفة، ثم يقوم حاجز مغناطيسي بتجميع المغانيط النانوية المحملة بالسموم في خزان مباشرة قبل أن يعاد تدويرها، ويبقيها منفصلة عن الدم الذي تجري إعادة تدويره».

وطبقا لدراسة نُشرت في مجلة «أمراض وغسيل وزرع الكلى» في فبراير 2011م، فقد تمكن الباحثون من إزالة 75% من

(1) مغانيط نانوية.. للقضاء على الأمراض في جسم الإنسان، جريدة الشرق الأوسط، الجمعة 18 صفر 1433 هـ، 13 يناير 2012م، العدد 12099.

«ديجوكسين»، وهو دواء للقلب يمكن أن يكون قاتلًا إذا تم تعاطيه بجرعات كبيرة مرة واحدة باستخدام جهاز لترشيح الدم؛ حيث قامت المغانيط النانوية بإزالة 90% من الـ«ديجوكسين»، بعد انتهاء عملية التطهير، التي استغرقت ساعة ونصف الساعة.

وأحد المحاذير الخطيرة التي ينبغي على الباحثين إثبات عدم حدوثها، هو أن تكون هذه الجسيمات سامة للجسم، وأنها لن تعوق قدرة الدم على التجلط، لكن النتائج الأولية واعدة؛ حيث أظهرت مجموعة هيرمان من خلال بحث في الطب النانوي عام 2011م، أن المغانيط النانوية لم تتلف الخلايا أو تساعد على التخثر، وهما اثنان من أهم معايير السلامة.

وفي الاجتماع السنوي للجمعية الأميركية لأطباء التخدير، الذي عقد في أكتوبر 2011م، قدمت هرمان بيانات تظهر أن المغانيط النانوية قد تم تقبلها جزئيًّا من قبل الوحيدات والبلاعم، وهما نوعان من الخلايا المناعية؛ حيث يعد هذا دليلًا مهمًّا، من حيث المبدأ، لأي تطبيق محتمل لهذه التكنولوجيا في المستقبل في محاربة الالتهابات الخطيرة.

وتجري هيرمان وزملاؤها الآن دراسة على استخدام هذه التكنولوجيا مع الفئران التي تعاني الإنتان، وهو نوع شديد من العدوى التي تصيب الدم، وتتسبب في حدوث تراكم هائل من

الجزيئات المناعية الضارة؛ حيث يصاب نحو مليون شخص في الولايات المتحدة كل عام بالإنتان الشديد.

ويقول جون دوبسون، وهو مهندس طب حيوي في جامعة فلوريدا: إن إزالة السموم تعد أحد تطبيقات تكنولوجيا النانو (المثيرة للاهتمام حقًّا)؛ حيث قامت مجموعته باستخدام الجسيمات النانوية المغناطيسية: كنوع من أجهزة التحكم عن بعد لمعالجة النشاط الخلوي، مثل تمايز الخلايا الجذعية «عند استخدام المواد الكيميائية يكون من الصعب إيقاف العملية بعد أن تبدأ، لكن التكنولوجيا المغناطيسية تمكننا من تشغيل وإيقاف العملية كيفما نرغب».

وقد تتجاوز الاستخدامات المحتملة لأسلوب الفريق السويسري معالجة الإنتان إلى غيره من الأمراض، بما في ذلك سرطان الدم، فقد يكون من الممكن، على سبيل المثال، تصميم مغانيط نانوية يمكنها الاتحاد مع خلايا اللوكيميا المنتشرة في الدم، بحيث تقودها إلى خارج الجسم.

ويقول تومسون ميفورد، وهو خبير في تكنولوجيا النانو في جامعة كليمسون: إن هذا النهج الجديد يعد نهجًا واعدًا؛ حيث إنه يلاحظ أن جسم الإنسان يعد بيئة عالية التأكسد، مما يضعف الخواص المغناطيسية لمادة الجسيمات الممغنطة، نتيجة

لأكسدة الحديد، لكن فكرة طلاء المغانيط النانوية بالكربون، التي ابتكرها مجموعة الباحثين السويسريين، ربما كانت هي الحل الأمثل لمنع حدوث هذا التآكل، لكنه يقول، على الرغم من ذلك: إنه لم يتم التحقق بعد من مدى جدوى هذه الطريقة؛ حيث «يتمثل التحدي الحقيقي لهذه الطريقة الجديدة في التأكد من عدم إعاقة المغانيط النانوية للدورة الدموية، وعدم قيام الجهاز المناعي بمهاجمتها، وعدم تجمعها معًا في كتلة واحدة»[1].

و- الأذن النانوية لسماع الفيروسات والبكتيريا:

الأذن النانوية- من اختراع د.جوشين فيلدمان Dr. Jochen Feldmann وزملائه من جامعة «لودفيش ماكسيميليان» في ميونيخ - عبارة عن جسيمات مجهرية «ميكروسكوبية» من الذهب لا يزيد قطرها عن 60 نانومتر المسلط عليه شعاع الليزر، وهذه الأذن لها القدرة على سماع الأشياء الأكثر خفوتًا مليون مرة أكثر مما نسمعه نحن بالأذن العادية، ويعد هذا الاختراع بمثابة خطوة فعالة لفتح مجال جديد في الدراسات المجهرية الصوتية (acoustic microscopy) حيث يمكن دراسة الكائنات الحية باستخدام الأصوات التي تنبعث منها.

---

(1) المرجع السابق نفسه.

يتم الإدراك لهذه الموجات الصوتية عندما ينضغط الهواء من قبل موجات التضاغطات، فتسافر هذه الموجات الصوتية للأمام والخلف محل الجزيئات التي تمر بها، وستقوم بتحديد الصوت، وذلك لتقيس هذه الحركة ذهابًا وإيابًا، وقد تم تطوير (Nano-microphone) بعد الأذن النانوية، التي تسمح للعلماء من الاقتراب أكثر من الكائنات المجهرية.

وهذه التقنية تمكنا من التعرف أكثر حول التغييرات التي تحدث في الخلايا، والتي تؤدي لحدوث الأمراض، فمثلًا على سبيل المثال كرات الدم الحمراء، تصبح أقل اهتزازًا عندما تصاب بطفيليات الملاريا.

وتستطيع تلك الأذن النانوية استشعار الأصوات حتى سالب (-) 60 ديسيبل، ومن ثم يعد أكثر الأجهزة حساسية للصوت، التي تقدر على كشف الموجات الصوتية عن أي جهاز آخر. كما يمكن ترتيب هذه الأذن في نسق ثلاثي الأبعاد لتستوعب الاستماع للميكروبات كالفيروسات والبكتيريا[1].

ولعل من أهم مزايا تلك الأذن النانوية:

- القدرة على استشعار حركة وتأثير الكائنات الدقيقة «البكتريا والفيروسات».

(1) www.dr-saud-a.com/vb/showthread.php?52676

- إمكانية التعرف حول التغييرات التي تطرق على الخلايا المصابة بالأمراض.
- تستطيع الأذن النانوية سماع الأصوات حتى سالب (-) 60 ديسيبل.