

تصميم وتنفيذ نظام تنبؤ ببعض المشاكل القلبية والرئوية بالاعتماد على معدل ضربات القلب ونسبة اشباع الأوكسجين بالدم

م. حلا عيسى حمصيه*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤/١١/١٢ . قُبِلَ للنشر في ٢٠٢٥/٧/٢٨)

□ ملخص □

تصميم نظام مراقبة مكون من حساس Oximeter متكامل نوع MAX30102 لقياس نسبة تشبع الاوكسجين في الدم عن طريق الاصبع حيث أن أي خلل في القياس يعكس وجود خلل او حالة التهابية بالجهاز التنفسي (الرئتين) وقياس عدد وانتظام ضربات القلب من خلال حساس نسبة التشبع بالأوكسجين والعمل أيضاً على تزويد النظام المصمم بنظام انذار صوتي وضوئي في حال وجود خلل أو مضاعفات ضمن جسم المريض لتنبئه المستخدم سواء كان مختص أو غير مختص في حال وجود مشكلة في نسبة تشبع الأوكسجين بالدم أو عدد ضربات القلب أو انتظام ضربات القلب. تم تصميم واجهة تخاطبية معتمدة على برنامج NI LabView 2020 (32-bit) تظهر حالة القلب والرئتين عند القيم المقاسة عبر النظام المصمم عن طريق مؤشرات مختلفة لكل من القلب والرئتين كنسبة الإشباع بالأوكسجين ومعدل ضربات القلب.

تم تجربة النظام على عدد من المتطوعين الذي بلغ عددهم خمسة عشر شخصاً مختلفين من حيث العمر (تتراوح أعمارهم بين ١٧ و ٧٥ سنة) والجنس (سبع ذكور وثمانية من الإناث) وقد أظهر النظام فعالية جيدة وكان العمل بالزمن الحقيقي حيث بلغت نسبة الفعالية ٩٣٪ من حيث الدقة وبتأخير زمني لا يتجاوز ٠.٥ ثانية.

الكلمات المفتاحية: معدل ضربات القلب، نسبة تشبع الأوكسجين في الدم، LabView, حساس Oximeter.

Design and Implementation of a System for Detecting Certain Cardiac and Arterial Problems Based on Heart Rate and Blood Oxygen Saturation Level

Eng. Hala Essa Houmsia*

(Received 12/11/2024 . Accepted 28/7/2025)

□ ABSTRACT □

This work presents the design of a monitoring system that incorporates an integrated oximeter sensor (MAX30102) to measure blood oxygen saturation through the finger. Any deviation in the measurement may indicate a dysfunction or an inflammatory condition in the respiratory system (lungs). The system also monitors heart rate and rhythm using the same sensor. An audiovisual alarm is integrated to alert the user whether a medical professional or not in the event of abnormal oxygen saturation, irregular heart rate, or heart rhythm anomalies.

A user interface is developed using LabView 2020 (32-bit, NI) to display the real time condition of the heart and lungs. The interface visualizes the measured parameters using distinct indicators for oxygen saturation and heart rate.

The system is tested on fifteen volunteers of varying ages (ranging from 17 to 75 years) and genders (seven males and eight females). The results demonstrate that the system operates effectively in real time, achieving an accuracy of 93% with a response delay of no more than 0.5 seconds.

Keywords: heart rate, blood oxygen saturation, LabView, oximeter sensor.

*Master, Technical Engineering College, Tartous University.

١- مقدمة

إن مراقبة معدل ضربات القلب ومستوى الأكسجين في الدم (نسبة تشبع الأكسجين بالدم) أمران حيويان للحفاظ على صحة الإنسان و يمكن أن توفر هذه المراقبة معلومات قيمة عن صحة القلب والدورة الدموية والرئتين، مما يساعد على اكتشاف المشكلات في وقت مبكر والوقاية من المضاعفات الخطيرة بالتالي يصبح بالإمكان الكشف عن عدم انتظام ضربات القلب من خلال مراقبة ضربات القلب وكشف أي خلل في نظم ضربات القلب، مثل الرجفان الأذيني أو انخفاض معدل ضربات القلب وكذلك يمكن تقييم صحة القلب من خلال المساعدة في تحديد وجود أمراض في عضلة القلب، مثل أمراض الشرايين التاجية أو قصور القلب إضافة إلى ذلك يمكن تتبع فعالية العلاج المطبق من حيث المساعدة في تقييم فعالية أدوية القلب أو العلاج الطبيعي وكذلك المساعدة على التنبؤ بخطر حدوث مشاكل قلبية أو رئوية مستقبلية، مثل السكتة الدماغية أو الجلطة القلبية ويعتبر القلب محرك الدورة الدموية في الجسم ورمز الحياة في الإنسان فهو عبارة عن عضلة تعمل باستمرار لضخ الدم لجميع أجزاء الجسم حاملاً الأكسجين والغذاء إلى مختلف أنحاء الجسم ليبقى ينبض بالحياة. ينبض القلب ٤٠ مرة عند المولود الجديد، ويتناقص هذا العدد إلى ١٠٠ في عمر الثلاث سنوات، ويستمر العدد بالتناقص حتى يصل إلى معدل ٨٠ نبضة في الدقيقة عند الإنسان البالغ [1]. يختلف معدل دقات القلب حسب النشاط الذي يقوم به الإنسان أما في حالة الراحة فإن القلب يعود إلى معدل النبضات الطبيعي لأن الإنسان لا يحتاج إلى الكثير من الطاقة في تلك الحالة حيث أن القلب ينبض ما يقارب ١٥ ألف نبضة في اليوم، و ٤٢ مليون مرة في السنة، وثلاثة بلايين مرة في متوسط عمر الإنسان [3-1].

١-١ الدراسات المرجعية:

١. البحث الذي نشر عام ٢٠١٩ من قبل الباحثة Heba Safar بعنوان What are the arterial saturation discrepancies in some pediatric diseases and the risk oxygen مستويات تشبع الأكسجين الشرياني عند بعض أمراض الأطفال والعوامل التي تزيد من خطر نقص نسبة تشبع الأكسجين بالدم. أجريت الدراسة على ثلاث مجموعات من الأطفال الذين يعانون من أمراض قلب خلقية زرقاء، أمراض قلب خلقية غير زرقاء، والمرضى الذين يعانون من التلاسيميا الكبرى. تم قياس تشبع الأكسجين لديهم باستخدام مقياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم. أظهرت الدراسة أن فشل القلب يعد من العوامل التي تزيد من خطر نقص نسبة تشبع الأكسجين بالدم في مجموعة أمراض القلب الخلقية غير الزرقاء، حيث أن ٩٧٪ من مرضى القلب الزرقاوي وغير الزرقاوي كانوا يعانون من نقص تشبع الأكسجين بالدم وحوالي ٥٠٪ من مرضى التلاسيميا الكبرى أظهروا انخفاضاً في نسبة تشبع الأكسجين بالدم، تم الاستفادة من البحث في تحديد نسبة تشبع الأكسجين بالدم عند الأطفال المصابين بأمراض قلبية.

٢. عام ٢٠٢٠ تم نشر بحث من قبل Esrat Jahan, Tilottoma Barua, Umme Salma بعنوان AN OVERVIEW ON HEART RATE MONITORING AND PULSE OXIMETER SYSTEM يتناول البحث تقنيات مراقبة معدل ضربات القلب وقياس نسبة الأكسجين في الدم باستخدام جهاز قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم. الهدف من الدراسة هو توفير طريقة غير جراحية

وسهلة الاستخدام لقياس معدل ضربات القلب وتشبع الأكسجين في الدم بشكل دقيق وفعال. اعتمد النظام على تقنيات ضوئية تقيس امتصاص الأشعة الحمراء والأشعة تحت الحمراء بواسطة الدم المحمل بالأكسجين أو غير المحمل بالأكسجين. تم عرض النتائج في الزمن الحقيقي على شاشة عرض LCD، كما تم إرسال البيانات إلى جهاز كمبيوتر لتخزينها وتحليلها. يعتبر النظام فعالاً من حيث التكلفة وسهل الاستخدام حتى من قبل الأشخاص غير المتخصصين تم الاستفادة من البحث في طريقة حساب معدل ضربات القلب ونسبة تشبع الأكسجين بالدم.

٣. في عام ٢٠٢٠ تم إجراء دراسة من قبل مجموعة من الباحثين Merve Yumrukuz, Hikmet FIRAT, Emine Bahar بعنوان Evaluation of transcutaneous carbon dioxide and saturation monitoring during fiberoptic bronchoscopy تم في هذه الدراسة مراقبة مجموعة من المرضى عددهم ١٣٥ منهم المدخنين وغير المدخنين وتم قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم spo2 وكذلك نسبة غاز ثنائي أكسيد الكربون في الدم pCO2 وتأثيره على حالة المريض الرئوية والقلبية تم القياس عن طريق الجلد كما في بحثنا وقد أظهرت النتائج انخفاض ملموس في نسبة تشبع الأكسجين بالدم عند المدخنين وارتفاع في نسبة غاز ثنائي أكسيد الكربون وقد تم الاستعانة بنتائج البحث من أجل نسبة تشبع الأكسجين بالدم الطبيعية من ٩٥٪ وأعلى وغير الطبيعية أقل من ٩٠٪ وكذلك التنبؤ بخطر مشاكل رئوية وآفات صدرية عند انخفاض نسبة تشبع الأكسجين بالدم إلى أقل من ٩٠٪.

٤. تناول البحث المنشور عام ٢٠٢٢ من قبل Chunhu Shi, Mark Goodall, Jo Dumville, James Hill, Gill Norman, Oliver Hamer, Andrew Clegg, Caroline Leigh Watkins, George and Nicky Georgiou, Alexander Hodgkinson, Catherine Elizabeth Light body, Paul Dark بعنوان The accuracy of pulse oximetry in measuring oxygen saturation by levels of skin pigmentation في قراءة تشبع الدم بالأكسجين لأصحاب البشرة الداكنة مقارنة بأصحاب البشرة الفاتحة وذلك بسبب الاختلاف في امتصاص الأشعة الحمراء وتحت الحمراء بسبب اختلاف لون البشرة وهو ما أثار المخاوف وخاصة خلال جائحة كورونا حيث كانت نسبة الخطأ ١.٥٢٪ تم الاستفادة من البحث في قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم.

٥. تم نشر مقال عام ٢٠٢٢ من قبل Andrian Rakhmatsyah, Aulia Arif Wardana بعنوان Detection of Oxygen Levels (SpO2) and Heart Rate Using a Pulse Oximeter for Classification of Hypoxemia Based on Fuzzy تشبع الأكسجين بالدم ومعدل ضربات القلب بالاعتماد على حساس MAX30102 ويعتمد على تقنية المنطق الضبابي في التنبؤ بنقص نسبة تشبع الأكسجين بالدم وقد أظهرت النتائج دقة تصل إلى ٨٠٪ وحساسية تصل إلى ٦٠٪ ومعدل خصوصية يصل إلى ١٠٠٪ تم الاستفادة من البحث في التعامل مع وحدة قياس MAX30102.

٦. تناول البحث المنشور عام ٢٠٢٢ من قبل Stefano Marinari, Pasqualina Volpe, Marzia Simoni, Matteo Aventaggiato, Fernando De Benedetto, Stefano Nardini, Claudio M. Sanguinetti and Paolo Palange بعنوان Accuracy of a New Pulse Oximetry in Detection of Arterial Oxygen Saturation and Heart Rate Measurements دراسة دقة جهاز BrOxy M لقياس تشبع الأكسجين في الدم ومعدل ضربات القلب ومقارنته مع جهاز طبي مرجعي معتمد وقد أظهرت النتائج قيمة وسطية

لخطأ القياس بلغت ٠.١٨٪ في قياس تشبع الأكسجين ونسبة خطأ ٠.٢٥ نبضة في قياس معدل ضربات القلب وهو ما يعكس الدقة العالية في القياس.

٧. تم في عام ٢٠٢٣ نشر بحث بعنوان Pulse oximetry values from 33,080 participants in the Apple Heart & Movement Study من الباحثين Ian Shapiro, Jeff Stein, Calum MacRae, Michael O'Reilly من الأشخاص المختلفين من حيث الجنس (ذكور، اناث) والعمر وكتلة الجسم لقياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم في الدم بين فترات اليوم المختلفة وقد تم الاستفادة من الدراسة حيث أنها بينت أنه لا يوجد فرق يذكر بين الذكور والاناث من حيث نسبة تشبع الأكسجين بالدم الطبيعية بل هناك عوامل أخرى أكثر تأثيراً كالعمر ونمط الحياة.

٨. تم في هذا البحث الذي نشر عام ٢٠٢٣ من قبل Philipp Helmer, Philipp Rodemers, Sebastian Hottenrott, Robert Leppich, Maja Helwich, Rüdiger Pryss, Peter Kranke, Patrick Meybohm, Bernd E. Winkler, and Michael Sammeth بعنوان Evaluating blood oxygen saturation measurements by popular fitness trackers in postoperative patients قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم في الدم لتقييم دقة أجهزة اللياقة البدنية مثل Apple Watch7, Garmin Fenix 6 pro, Withing ScanWatch وهذه الأجهزة المنزلية استخدمت حساس نوع Reflective PPG حيث أنه يعتمد على تقنية انعكاس الضوء وليس النفاذ للضوئي المعتمد في الأجهزة الطبية الأكثر دقة حيث أن هذه الأجهزة ترسل اشعة حمراء وتحت حمراء وتقيس كمية الضوء المنعكس من الانسجة ثم يتم حساب نسبة spo2 وقد أظهرت النتائج دقة نسبية تصل الى حوالي ٩٦٪ عند الراحة فقط ولكنها اقل دقة وموثوقية عند الحركة او الرجفان او ضعف التروية الدموية.

٢-١ مشكلة البحث:

إن الأجهزة المستخدمة في قياس معدل نبضات القلب ونسبة تشبع الأكسجين في الدم متنوعة وتختلف من حيث الدقة ولكنها تعطي قراءة فقط دون تحليل لدلالة القراءات لذلك هل من الممكن تصميم نظام يتنبأ بالمشكلات القلبية والرئوية المحتملة بالاعتماد على قياس معدل نبضات القلب ونسبة تشبع الأكسجين بالدم؟

٣-١ خلفية نظرية:

١-٣-١ النشاط الكهربائي للقلب:

يتم توليد الحركة القلبية المنتظمة بواسطة نظام الإثارة ونقل النبضات الذاتي للقلب. ويُعدُّ مركز الإثارة نسيجاً خاصاً مؤلفاً من ألياف عضلية رقيقة تتوضع في جدار الأذينة اليمنى وهذا ما يدعى بالعقدة الأذينية أو عقدة كيث فلاك [1-2] التي تقوم بإنتاج الاشارات الكهربائية في الأحوال العادية والطبيعية لم يتم حتى الآن الكشف بشكل كامل عن آلية التحريض التي تسبب حدوث هذه الإثارة وهذا ما يعرف بتلقائية عمل القلب. يمكن للتوزيع الكهربائي لنشاط القلب أن يُوصف فيزيائياً وفقاً لمعادلة نرنست التي تدل على الناقلية الكهربائية وعامل النفوذ الكهربائي للعناصر الأيونية الأساسية كأيونات البوتاسيوم (K+) وأيونات الصوديوم (Na+) المبنية على الشكل التالي:

$$u_{ie} = \left(\frac{R.T}{F.Z} \right) \cdot \log \frac{c_e}{c_i} \quad (1)$$

حيث R: ثابت الغازات العام $R = 8.31$. T: درجة الحرارة المطلقة. F: ثابت فاراداي $F = 96600$

Z: الجاهزية الأيونية. C_e : التركيز الأيوني الخارجي. C_i : التركيز الأيوني الداخلي.

ترتبط بالمرحل الكهربية الفيزيولوجية التي تحدث على الغشاء لكل خلية من ألياف العضلات القلبية حيث ينتج هذا النشاط فروق الجهد الأيوني بين الغشاء من الداخل والخارج وفقاً لمعادلة نرنست [3].

1-3-2 مبادئ قياس التشبع بالأكسجين:

حوالي عام 1860 تم التوصل إلى أن المادة الملونة في الدم الهيموغلوبين تقوم بنقل الأكسجين حيث أن الهيموغلوبين هو بروتين مرتبط بكريات الدم الحمراء [3] وقد لوحظ في الوقت نفسه أن امتصاص الأشعة المرئية من قبل محلول الهيموغلوبين يتغير بحسب درجة نسبة تشبع الأكسجين بالدم وذلك لأن الصيغتين الشائعتين لجزيئة الهيموغلوبين (porb)، الهيموغلوبين المؤكسج (HbO₂ oxygenated hemoglobin) والهيموغلوبين المختزل (Hb deoxygenated hemoglobin) لهما خواص ضوئية مختلفة في المجال الموجي من الطيف الكهروضوئي الممتد من 600 إلى 1000 نانومتر ويشكل الأكسجين المرتبط كيميائياً مع الهيموغلوبين داخل كريات الدم الحمراء تقريباً كل الأكسجين الموجود في الدم رغم وجود كمية صغيرة جدا منحلّة في البلازما ونرمز لتشبع الأكسجين عادة بـ SpO_2 pulse oximetry oxygen saturation، ويعرف بأنه نسبة الهيموغلوبين المؤكسج إلى الهيموغلوبين الكلي [4] كما تبين العلاقة (2):

$$SpO_2 = \frac{[HbO_2]}{[Total\ heamoglobin]} \quad (2)$$

حيث HbO_2 الهيموغلوبين المؤكسج. $Total\ heamoglobin$ الهيموغلوبين الكلي.

تحت الظروف الفيزيولوجية الطبيعية يكون نسبة التشبع في الدم الشرياني 97 %، بينما تكون في الدم الوريدي 75%. من الممكن استخدام الفرق في الطيف الامتصاصي لنوعي الهيموغلوبين من أجل قياس نسبة تشبع الأكسجين الشرياني في الجسم لأن المجال الموجي بين 600 و 1000 نانومتر هو أيضاً المجال الذي يوافق أقل توهين يتعرض له الأشعة من نسيج الجسم حيث تمتص النسيج والأصبغة الأشعة الأصفر والأخضر والأزرق ويمتص الماء الأشعة تحت الحمراء ذات الطول الموجي الأكبر [5]. لذلك يتم قياس نسبة الأكسجين عن طريق قياس شدة الأشعة المار من خلال الإصبع (أو شحمة الأذن) عند طولي موجة مختلفين أحدهما أحمر 660nm، والأخر تحت الأحمر 910nm، وباعتبار أن مرور الأشعة خلال الشريان يعتمد على تركيز كل من Hb و HbO₂ ومعامل امتصاصية كل منهما عند طولي الموجة المستخدم فإن الشدة الضوئية المارة سوف تتناقص بشكل لوغاريتمي تبعاً لقانون بيير-لامبرت [3].

يمكن عندئذ حساب نسبة الأكسجين من العلاقة (3):

$$SpO_2 = \frac{C_o}{C_o + C_r} = \frac{\alpha_{r2} \cdot R - \alpha_{r1}}{(\alpha_{r2} - \alpha_{o2})R - (\alpha_{r1} - \alpha_{o1})} \quad (3)$$

حيث:

C_o : تركيز HbO₂. C_r : تركيز Hb. α_{on} : معامل امتصاصية HbO₂ عند طول الموجة λ_n .

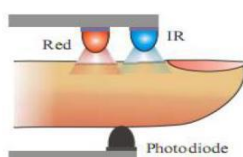
α_{rn} : معامل امتصاصية Hb عند طول الموجة λ_n . R: معدل نسبة تشبع الأكسجين بالدم.

كما يوضح الجدول (1) نسبة التشبع والتفسير الطبي لها [4].

الجدول (١) المتضمن نسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم والتفسير الطبي [4].

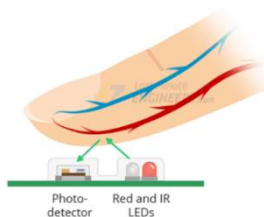
قراءة نسبة SPO2%	١٠٠-٩٥	٩٤-٩١	٩٠-٨٦	اقل من ٨٥
التفسير	طبيعي	نقص أكسجة خفيف	نقص أكسجة متوسط	نقص أكسجة حاد

يستخدم المقياس منبوعين ضوئيين (LEDs) يصدر أحدهما أشعة تحت حمراء والآخر أشعة حمراء وذلك عبر موقع من الجسم ذي شفافية مناسبة وتدفق جيد للدم. ويوجد في مقابل المنبع المضئي كاشف ضوئي يستقبل الأشعة المارة عبر منطقة القياس وهناك طريقتان لإرسال الأشعة عبر منطقة القياس هما الانتقال والانعكاس حيث أنه في طريقة الانتقال يكون المنبع الضوئي والكاشف متقابلين مع بعضهما وتقع بينهما منطقة القياس، وبذلك يستطيع الأشعة أن يمر عبر موقع القياس [4] كما هو موضح في الشكل (١).



الشكل (١) طريقة الانتقال في الكشف الضوئي.

أما في طريقة الانعكاس يكون المنبع والكاشف متجاورين مع بعضهما في أعلى منطقة القياس حيث يثب الأشعة من المنبع إلى الكاشف عبر منطقة القياس [4] كما يبين الشكل (٢).



الشكل (2) طريقة الانعكاس في الكشف الضوئي.

إن طريقة الانتقال هي النوع المستخدم الأكثر شيوعاً، وهي الطريقة المعتمدة في هذا البحث حيث ترسل إشارات الأشعة الأحمر والأشعة تحت الحمراء وتمر عبر منطقة القياس ليتم استقبالها عند الكاشف الضوئي.

ويجب الانتباه الى وجود مواد تمتص الأشعة بشكل ثابت ومستمر في موقع القياس وهي الجلد والنسج والدم الوريدي والدم الشرياني، ولكن مع كل نبضة للقلب يتقلص القلب مسبباً اندفاعاً عنيفاً للدم الشرياني، والذي يزيد لحظياً حجم الدم الشرياني في منطقة القياس، مما يؤدي إلى امتصاص أكبر للأشعة خلال فترة الاندفاع، وبالنظر إلى إشارات الأشعة المستقبلية عند الكاشف على أنها أمواج عرضية يجب أن يكون لهذه الأمواج قمم توافق نبضة القلب وانخفاض بين كل نبضتين [5] إذا تم طرح الأشعة الممتص عند قاع الموجة والذي يتضمن كل العوامل الممتصة الثابتة من الأشعة الممتص عند القمة، عند ذلك تكون

المحصلة هي خواص الامتصاص التابعة للحجم المضاف من الدم فقط وهو دم شرياني، عندئذ يمكن حساب النسبة R من العلاقة:

$$(4)R = \log_{10}((I_1/I_{in1})\lambda_1) / \log_{10}((I_2/I_{in2})\lambda_2)$$

حيث: R نسبة تشبع الأكسجين بالدم (معدل الامتصاص). I_{in} الشدة الضوئية المرسله عند الطول الموجي الموافق. λ طول الموجة. I الشدة الضوئية المستقبلية.

٢- أهداف البحث

١. تصميم وتنفيذ نظام لقياس معدل نسبة تشبع الأكسجين بالدم ومعدل ضربات القلب.
٢. المساعدة على التنبؤ بخطر حدوث مشاكل قلبية أو رئوية مستقبلية.

٣- طرائق البحث ومواده:

نورد فيما يلي أهم المواد المستخدمة في البحث

٣-١ المواد المستخدمة:

- مقياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم النبضي MAX30102 : حساس معدل ضربات القلب وهو عبارة عن حساس حيوي منخفض الطاقة يمكن استخدامه من قبل الطلاب والمهندسين الذين يرغبون في دمج بيانات معدل ضربات القلب الفعلية ضمن مشاريعهم[5]. تتميز الوحدة MAX30102 النسخة المطورة من الوحدة MAX30100 بأنها مقياس تأكسج نبضي متكامل ومستشعر معدل ضربات القلب C او من الأجهزة التناظرية فهو يجمع بين اثنين من مصابيح LED ، وكاشف ضوئي، وبصريات محسنة، ومعالجة إشارات تناظرية منخفضة الضوضاء للكشف عن إشارات قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم النبضي (SpO2) ومعدل ضربات القلب (HR) ويتكون MAX30102 من زوج من مصابيح LED عالية الكثافة RED و IR، وكلاهما بأطوال موجية مختلفة وكاشف ضوئي والأطوال الموجية لهذه المصابيح هي ٦٦٠ نانومتر و ٨٨٠ نانومتر على التوالي.

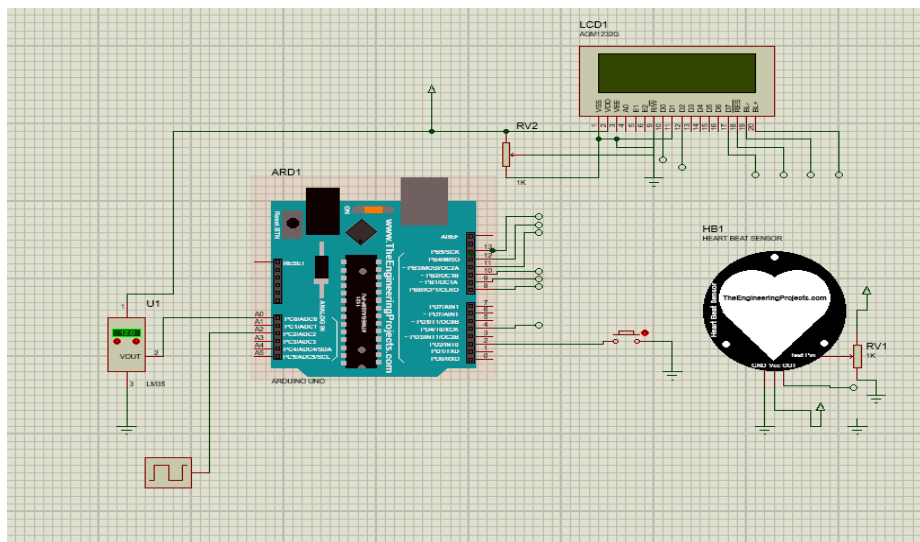
- لوحة ARDUINO UNO: عبارة عن لوحة متحكم تعتمد على متحكم ATmega328P يحتوي على ١٤ pin إدخال / إخراج رقمية يمكن استخدام ٦ منها كمخرجات PWM ، و ٦ مدخلات تناظرية، ومولد اهتزاز سيراميك ١٦ ميغاهرتز، واتصال USB ، ومقبس طاقة، ورأس ICSP (in circuit serial programming) وزر إعادة ضبط.

- شاشة LCD (liquid crystal display): شاشات LCD&I2C هي نوع من شاشات العرض البلورية السائلة التي تستخدم بروتوكول I2C للتواصل مع المتحكمات الدقيقة هو بروتوكول اتصال تسلسلي ثنائي الاتجاه يستخدم ناقلاً ثنائي السلك لنقل البيانات (SDA & SCL).

- برنامج NI LabView2020(32-bit) الذي يسمح ببناء واجهة تخاطبية مع المستخدم ويتم التواصل بين Arduino و LabVIEW برمجياً لإرسال واستقبال البيانات ومعالجتها واجراء العمليات المرغوبة عليها وعرضها على الواجهة بالطريقة المناسبة للمبرمج والواضحة للمستخدم.

- كما يبين الشكل (٣) نموذج الدارة المصممة عبر برنامج proteus لقياس وإظهار معدل ضربات القلب ونسبة تشبع الأكسجين بالدم وذلك نظراً لعدم تواجد حساس MAX30102 جاهز في المكتبات تم الاستعانة بحساس قياس نبضات القلب والذي يعتمد في عمله على قياس شدة الاشعة الحمراء الممتصة ولذلك لقياس

وإظهار قيمة HR وتم الاستعانة بمولد نبضات لتوليد إشارة مربعة بتردد 1HZ لمحاكاة نبضات القلب ويتم استخدام الفرق بين الأشعة الحمراء والأشعة تحت الحمراء الممتصة لحساب نسبة الأكسجين في الدم .spo2

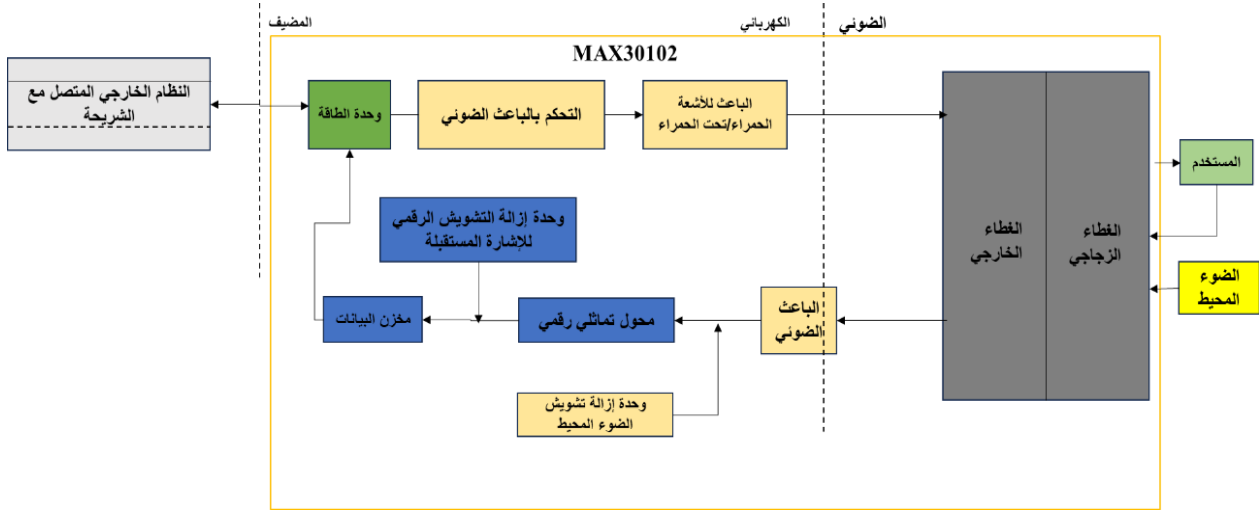


الشكل (٣) نموذج الدارة المصممة على برنامج proteus.

٣-٢ وصف عام لحساس MAX30102:

عبارة عن وحدة متكاملة لقياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم ومراقبة معدل ضربات القلب باستخدام الضوء المنبعث من LED واستشعار الضوء المرئى من الأنسجة البشرية وتشمل (power control) PC الذي يعتبر قلب الشريحة ويتحكم في تشغيل وحدات الشريحة الداخلية وتدفق البيانات بينها، LED DRIVERS وهي مسؤولة عن التحكم في عمل LED من حيث التشغيل وشدة الإضاءة للأشعة الحمراء وتحت الحمراء حيث انها مسؤولة عن ارسال نبضات ضوئية نحو الجلد لقياس شدة الامتصاص، RED/IR LED الصمام الثنائي الباعث للأشعة الحمراء وتحت الحمراء والتي ترسل اشعاعات نحو الجلد فيمتص الجلد قسم منه ويعكس قسم اخر بالاعتماد على كمية الأكسجين في الدم، PHOTO DIODE المستشعر الضوئي الذي يستقبل الأشعة المرتردة عن الجلد ويحولها الى إشارة كهربائية تستخدم لقياس كمية الأكسجين ومعدل النبضات، ADC- 18bit محول تماثلي رقمي يحول الإشارات الكهربائية القادمة من المستشعر الضوئي الى بيانات رقمية قابلة للمعالجة بدقة ١٨ بت، AMBIENT LIGHT وحدة CANCELLATION التي تضمن ان الاشعاعات المستقبلية من الإضاءة المنعكسة عن الجلد هي نفسها الأشعة المرسله من قبل LEDs فتقوم بإلغاء تأثير الإضاءة المحيطة مثل ضوء الشمس او مصابيح محيطة بالقياس والتي تقوم وحدة AMBIENT LIGHT باستشعار الإضاءة المحيطة لضمان دقة القياس، DIGITAL NOISE CANCELLATION التي تساهم هذه الوحدة في الحصول على دقة حسابية بإزالة التشويش الرقمي من الإشارة المستقبلية، DATA FIFO ذاكرة مؤقتة لتخزين البيانات الرقمية بشكل مرتب لتجنب فقدانها قبل ارسالها الى النظام الخارجي HOST، PACKAGING/COVER GLASS لتغليف العناصر الالكترونية وحمايتها لضمان عملها بكفاءة عالية وزجاج يساعد في حماية المكونات البصرية

وتوجيه الضوء الى الجلد بشكل فعال، HUMAN SUBJECT المستخدم [5]. كما يوضح الشكل (٤) البنية الداخلية لوحدة MAX30102.



الشكل (٤) البنية الداخلية لوحدة MAX30102.

3-3 مبدأ عمل دائرة القياس:

يعمل MAX30102 عن طريق تسليط أشعة حمراء وتحت حمراء على الإصبع أو شحمة الأذن أو بشكل أساسي في أي مكان لا يكون فيه الجلد سميكاً جداً، بحيث يمكن لهذه الأشعة اختراق الأنسجة بسهولة وقياس كمية الأشعة المنعكس باستخدام كاشف ضوئي ويتم تحويل هذه الأشعة الى تيار كهربائي عبر الثنائي الضوئي photodiode عبر المعادلة التالية:

$$i_{pd} = \frac{p_{in}}{\alpha} \quad (6)$$

حيث: i_{pd} تيار الثنائي الضوئي واحدته A.

α معامل الامتصاص واحدته W/A.

p_{in} الطاقة الضوئية المنعكسة عن الجلد واحدته watt.

والتيار الناتج يتناسب مع شدة الأشعة المنعكس وبعدها بمساعدة مضخم تحويل التيار الى جهد يتم تحويل

التيار الناتج الى جهد كهربائي وفق المعادلة التالية:

$$V_{out} = i_{pd}/R_f \quad (7)$$

حيث V_{out} جهد الخرج.

i_{pd} التيار الناتج عن الثنائي الضوئي.

R_f مقاومة التغذية في مضخم العمليات.

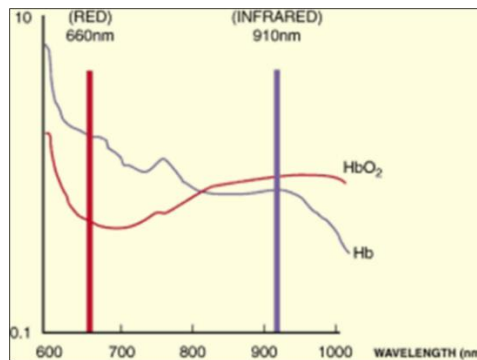
بعد ذلك يتم تحويل إشارة جهد الخرج التشابهيبة الى رقمية عبر محول تناظري رقمي ADC ثم تتم معالجة

الإشارات الرقمية الناتجة عبر فلتر رقمي لإزالة الضجيج الناتج عن الأشعة المحيط باستخدام خوارزمية Ambient

Light Cancellation (ALC) علماً أن الإشارة المستقبلية تحوي على مكونين أحدهما مستمر DC يمثل امتصاص

الأشعة الأساسي و الذي يستخدم لحساب نسبة تشبع الأكسجين بالدم في الدم SPO2 وجزء اخر متناوب AC يمثل

التغيرات في امتصاص الأشعة والناجمة عن نبضات القلب حيث يستخدم هذا الجزء في حساب معدل نبضات القلب، و تسمى طريقة الكشف عن النبض من خلال الأشعة بمخطط التحجيم الضوئي ويمكن تقسيم عمل MAX30102 إلى قياس معدل ضربات القلب HR وقياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم النبضي SPO2 (قياس مستوى الأكسجين في الدم). يعتمد قياس نسبة تشبع الأكسجين بالدم النبضي على اختلاف كمية الأشعة الأحمر والأشعة تحت الحمراء الممتصة والمنعكسة تختلف باختلاف كمية الأكسجين في الدم كما يبين الشكل (٥) التمثيل البياني لطيف امتصاص الهيموجلوبين المؤكسج (HbO₂) والهيموجلوبين غير المؤكسج (HB).



الشكل (٥) التمثيل البياني لطيف امتصاص الهيموجلوبين المؤكسج (HbO₂) والهيموجلوبين غير المؤكسج (HB) [6].

بحيث يمتص الدم غير المؤكسج المزيد من الأشعة الأحمر (RED) (٦٦٠ نانومتر)، بينما يمتص الدم المؤكسج المزيد من أشعة الأشعة تحت الحمراء (INFRARED) (٨٨٠ نانومتر). من خلال قياس نسبة الأشعة تحت الحمراء والأشعة الأحمر التي يتلقاها الكاشف الضوئي أي المنعكسة غير الممتصة من قبل الجلد والدم والأنسجة، يتم حساب مستوى الأكسجين (SpO₂) في الدم [6]. ولقياس معدل ضربات القلب يتميز الهيموجلوبين المؤكسج (HbO₂) في الدم الشرياني بخاصية امتصاص أشعة الأشعة تحت الحمراء فكما كان الدم أكثر قتامةً (كلما ارتفع الهيموجلوبين)، وازداد امتصاص الأشعة تحت الحمراء عندما يتم ضخ الدم عبر الإصبع مع كل نبضة قلب، تتغير كمية الأشعة المنعكس، مما يخلق شكلاً موجياً متغيراً عند خرج الكاشف الضوئي. مع الاستمرار في تسليط الأشعة عندها يمكن حساب عدد نبضات القلب (HR) من خلال الحصول على قيمة التيار الناتج عن الأشعة الممتصة من قبل الكاشف الضوئي للأشعة تحت الحمراء ثم تصفية الإشارة بتطبيق مرشح تمرير منخفض وفق المعادلة التالية (8):

$$(1 - Y(t) \cdot (\alpha - 1) + X(t) \cdot \alpha) = Y(t) \quad (8)$$

حيث $X(t)$ الإشارة الاصلية، $Y(t)$ الإشارة المفلترة، α معامل التصفية.

وبهذا يتم الكشف عن القمم في الإشارات الناتجة والتي تعكس نبضة قلبية أي كل قمة هي نبضة

قلبية ثم يتم حساب الزمن بين كل قمة والتي تليها أي بين كل نبضة قلب والتي تليها وفق المعادلة التالية:

$$T_{peak1} - T_{peak2} = \Delta T \quad (9)$$

حيث T_{peak1} زمن النبضة الأولى، T_{peak2} زمن النبضة الثانية، ΔT الفرق في الزمن بين

نبضتين متتاليتين.

وبهذا يتم الاعتماد على العلاقة (10) في حساب معدل نبضات القلب HR وفق التالي:

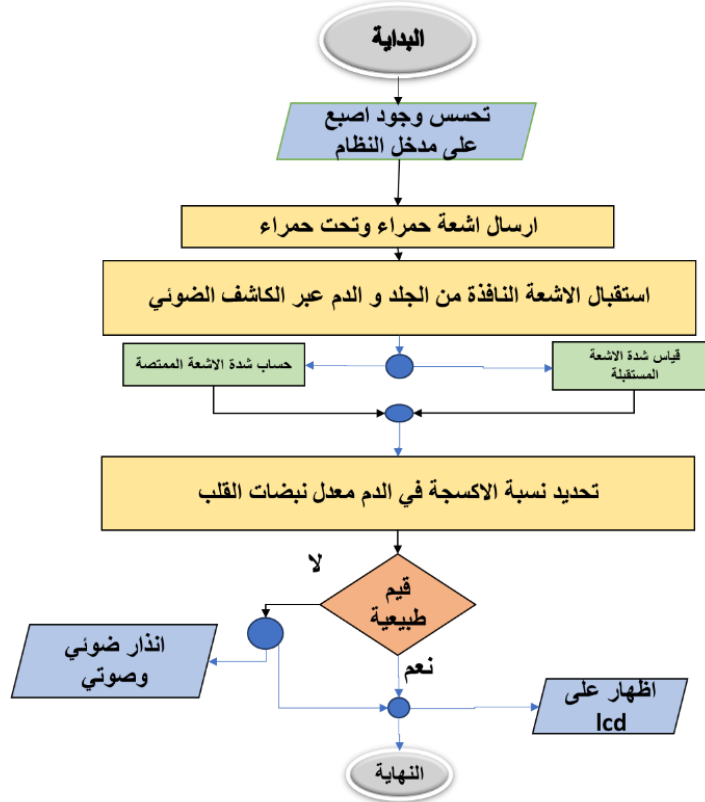
$$60/\Delta T = HR \quad (10)$$

لقياس معدل نسبة تشبع الأكسجين بالدم SPO2 يتم الاعتماد على مبدأ اختلاف كمية الأشعة الحمراء والأشعة تحت الحمراء الممتصة باختلاف كمية الأكسجين في الدم كما يبين الشكل (٥). يمتص الدم غير المؤكسج المزيد من الأشعة الأحمر (٦٦٠ نانومتر)، بينما يمتص الدم المؤكسج المزيد من أشعة الأشعة تحت الحمراء (٨٨٠ نانومتر). من خلال قياس نسبة الأشعة تحت الحمراء والأشعة الأحمر التي يتلقاها الكاشف الضوئي، يتم حساب مستوى الأكسجين (SpO2) في الدم وفق العلاقة التالية [7]، [8].

من خلال حساب R نسبة الامتصاص من العلاقة (4) ثم تطبيق العلاقة (11) التجريبية المتعلقة بضبط الحساس MAX30102.

$$spo2 = R * 25 - 110 \quad (11)$$

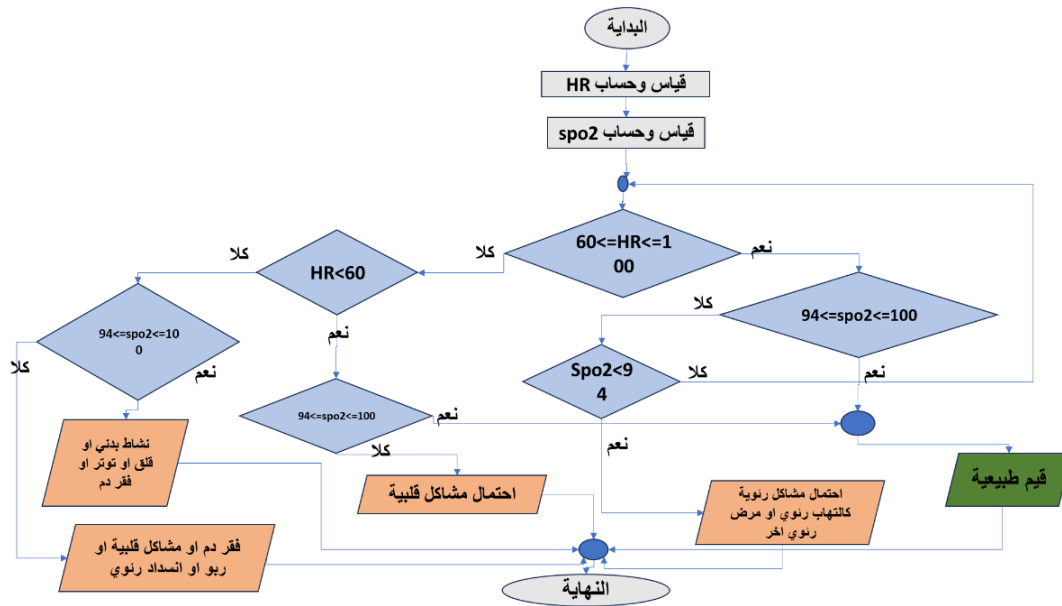
وبعدها ترسل البيانات الى المتحكم الاردوينو عبر واجهة اتصال I2C حيث يقوم الاردوينو بقراءة الإشارات الواردة وتحليلها عبر تحويلات فورييه للحصول على معدل نبضات القلب ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم في الدم وعرضها على شاشة LCD. كما يبين الشكل (٦) خوارزمية عمل النظام المصمم:



الشكل (٦) خوارزمية عمل النظام المصمم.

3-4 خوارزمية عمل دائرة التحكم:

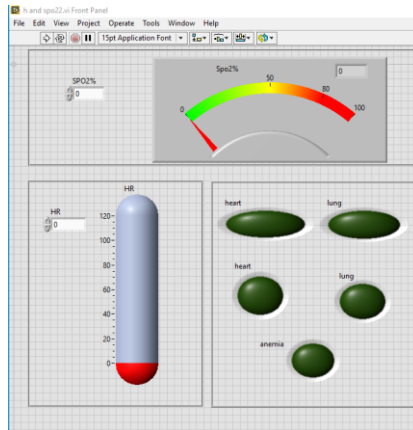
كما يبين الشكل (٧) خوارزمية معالجة بيانات معدل ضربات القلب ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم في الدم والتوقع بحالة القلب والرتنين.



الشكل (٧) خوارزمية معالجة بيانات معدل ضربات القلب ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم.

3-5 الواجهة التخابية عبر LabView:

يبين الشكل (٨) الواجهة المصممة عبر بيئة LabView التي تسمح بعرض قيمة معدل نبضات القلب بشكل رقمي وكمؤشر scale وكذلك عرض النسبة المئوية لتشبع الأكسجين في الدم على شكل رقمي وكمؤشر scale آخر أيضاً ثم معالجة قيم هذه البيانات وإظهار حالة القلب والرئتين عند المستخدم على شكل مجموعة من المؤشرات التي تشير إلى حالة جيدة مؤشر بلون أخضر للقلب وآخر بلون أخضر للرئتين أو وجود إشكالية في القلب أو الرئتين مؤشر بلون أحمر للقلب وآخر بلون أحمر للرئتين أو كلاهما معاً.



الشكل (٨) الواجهة المصممة عبر بيئة LabView.

٣-٦ طريقة الربط بين Arduino و LabView

هناك عدة طرق للربط بين تطبيق LabView ولوحة Arduino ومنها الاتصال عبر المنفذ التسلسلي عبر أداة NI VISA الموجودة ضمن مكتبات LabView او يتم تحميلها وتثبيتها داخل مكتبات LabView بالإضافة الى تثبيت برنامج Arduino IDE وتوصيل Arduino بالحاسوب عبر منفذ USB وتحميل الكود البرمجي () serial. Begin () و () serial. Read الذي يسمح بإرسال واستقبال البيانات ثم تعريف المنفذ التسلسلي باستخدام VISA resource name لاختيار المنفذ التسلسلي المراد التوصيل عبره وبعدها استخدام أداة NI VISA عبر VISA configure serial port لتحديد اعدادات المنفذ الذي تم اختياره ويجب ان تكون الاعدادات متطابقة بين Arduino و LabView ثم باستخدام VISA Read و VISA Write لإرسال واستقبال البيانات بين Arduino و LabView .

٣-٧ عينات الدراسة:

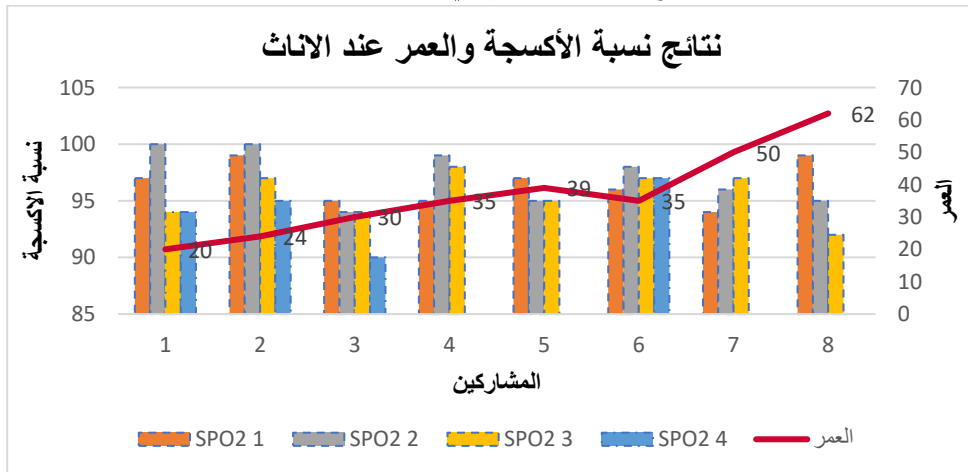
تم اجراء الاختبارات على مجموعة من الذكور أعمارهم (١٧-٢٦-٢٧-٣٤-٤٤-٥٤-٧٥) وعلى عدد من الاناث تتراوح أعمارهم بين (٢٠-٢٤-٣٠-٣٥-٣٥-٣٩-٥٠-٦٢) تم تكرار الاختبارات بمعدل من ثلاث الى خمس اختبارات لكل شخص.

٤- النتائج ومناقشتها:

تم اجراء الدراسة التجريبية على مجموعة من الأشخاص يبلغ عددهم خمسة عشر شخصاً مختلفين من حيث العمر (تتراوح أعمارهم بين ١٧ و ٧٥ سنة) والجنس (سبع ذكور وثمانية من الاناث).

٤-١ نتائج اختبار نسبة تشبع الأكسجين بالدم على الإناث المشاركين بالاختبارات:

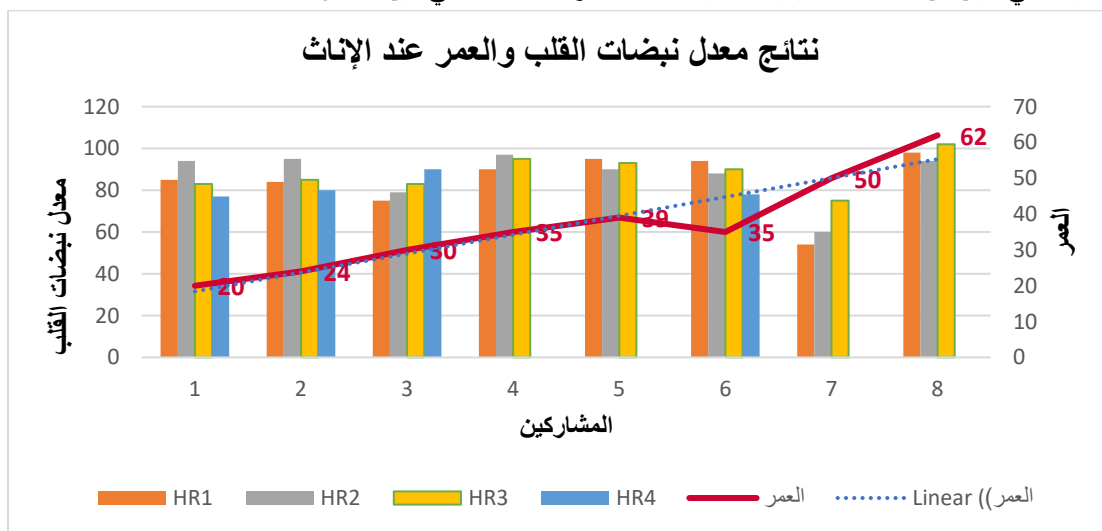
يبين الشكل (٩) المخطط البياني المعبر عن نتائج الاختبارات التي أجريت على مجموعة من الاناث بلغ عددهم ثمانين مشاركات من مختلف الاعمار حيث تم تكرار الاختبار عدد من المرات بمعدل من ثلاث الى خمس اختبارات لكل مشاركة على حدي وسجلت النتائج على شكل مخطط بياني يوضح اختلاف نسب نسبة تشبع الأكسجين بالدم باختلاف العمر والحالة الصحية وهو ما يتوافق مع النتائج الواردة في الدراسات المرجعية التي تبين أن النسب الطبيعية الطبية لنسبة تشبع الأكسجين بالدم هي بين ٩٤ و ١٠٠٪.



الشكل (٩) منحنى بياني للعلاقة بين النسبة المئوية لنسبة تشبع الأكسجين بالدم والعمر عند الاناث المشاركين في الاختبارات.

٤-٢ نتائج اختبار معدل نبضات القلب على الإناث المشاركين بالاختبارات:

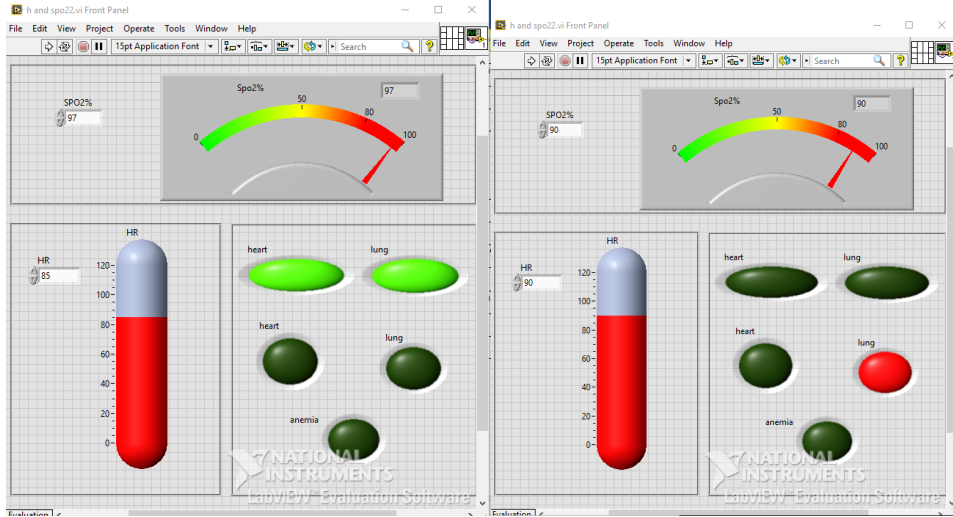
يبين الشكل (١٠) المخطط البياني المعبر عن نتائج الاختبارات التي أجريت على مجموعة من الإناث بلغ عددهم ثماني مشاركات من مختلف الأعمار حيث تم تكرار الاختبار عدد من المرات بمعدل من ثلاث الى خمس اختبارات لكل مشاركة على حدي وسجلت النتائج على شكل مخطط بياني يوضح اختلاف معدل ضربات القلب باختلاف العمر والحالة الصحية وهو ما يتوافق مع النتائج الواردة في الدراسات المرجعية التي تبين أن النسب الطبيعية الطبية لمعدل ضربات القلب هي بين ٦٠ و ١٠٠.



الشكل (١٠) منحنى بياني للعلاقة بين معدل نبضات القلب والعمر عند الإناث المشاركين في الاختبارات.

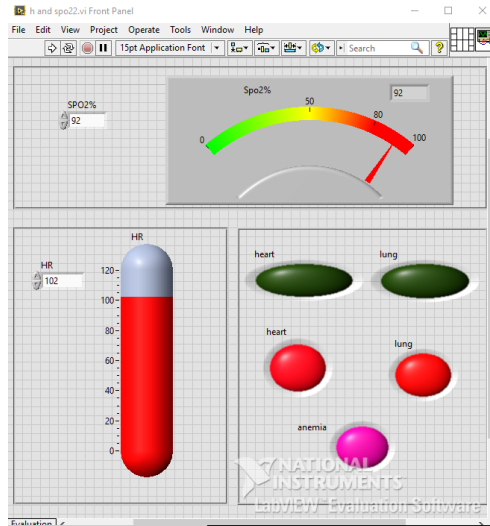
وبذلك كما نلاحظ من الشكلين السابقين ان نتائج الاختبارات كانت طبيعية عندما كان معدل نبضات القلب بين ٦٠ و ١٠٠ ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم بين ٩٤ و ١٠٠٪ ولكن كما نلاحظ في الاختبار على المشاركة ذات عمر الثلاثين عاما ان معدل نبضات القلب ٩٠ ضمن الطبيعي ولكن نسبة تشبع الأكسجين بالدم منخفضة الى ٩٠ ٪ وهنا النظام يعطي انذار باحتمال وجود مشاكل رئوية كما هو موضح في الشكل (١١) على واجهة اللابفيو.

كذلك نلاحظ الاختبار الذي اجري على المشاركة بعمر ٢٤ عاما بأن معدل ضربات القلب ٨٥ ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم طبيعية ٩٤٪ وهنا النظام يعطي عبر الواجهة المصممة بأن وضع القلب والرئتين طبيعي كما يبين الشكل (١٢).



الشكل (١١) واجهة لابفيو تعرض حالة القلب والرئتين. الشكل (١٢) واجهة لابفيو تعرض حالة القلب والرئتين.

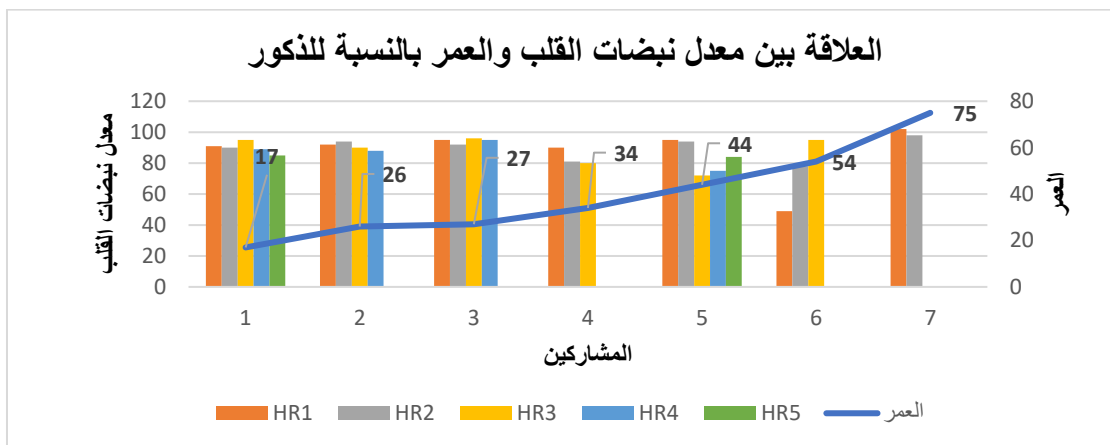
كما نلاحظ الاختبار الذي اجري على المشاركة بعمر ٦٢ عاما بأن معدل ضربات القلب ١٠٢ ونسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم ٩٢٪ وفي هذه الحالة النظام يعطي إنذارا باحتمال وجود مشاكل قلبية أو رئوية او فقر دم كما هو موضح في الشكل (١٣).



الشكل (١٣) واجهة لابفيو تعرض حالة القلب والرئتين.

٤-٣ نتائج اختبار نسبة تشبع الأكسجين بالدم على الذكور:

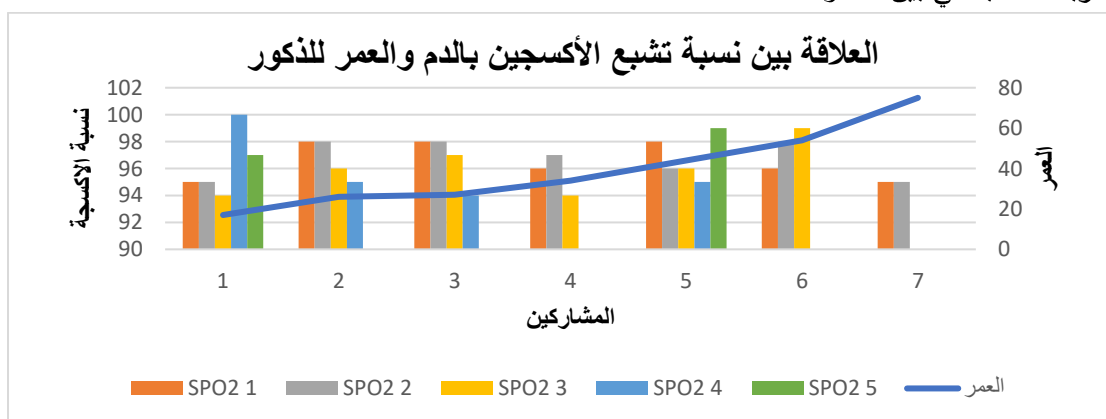
يبين الشكل (١٤) المخطط البياني المعبر عن نتائج الاختبارات التي أجريت على مجموعة من الذكور بلغ عددهم سبعة مشاركين من مختلف الاعمار حيث تم تكرار الاختبار عدد من المرات بمعدل من ثلاث الى خمس اختبارات لكل مشارك على حدي وسجلت النتائج على شكل مخطط بياني يوضح اختلاف نسب نسبة تشبع الأكسجين بالدم باختلاف العمر والحالة الصحية وهو ما يتوافق مع النتائج الواردة في الدراسات المرجعية التي تبين أن النسب الطبيعية الطبية لنسبة نسبة تشبع الأكسجين بالدم هي بين ٩٤ و ١٠٠٪.



الشكل (١٤) منحني بياني للعلاقة بين معدل نبضات القلب والعمر عند الذكور المشاركين في الاختبارات.

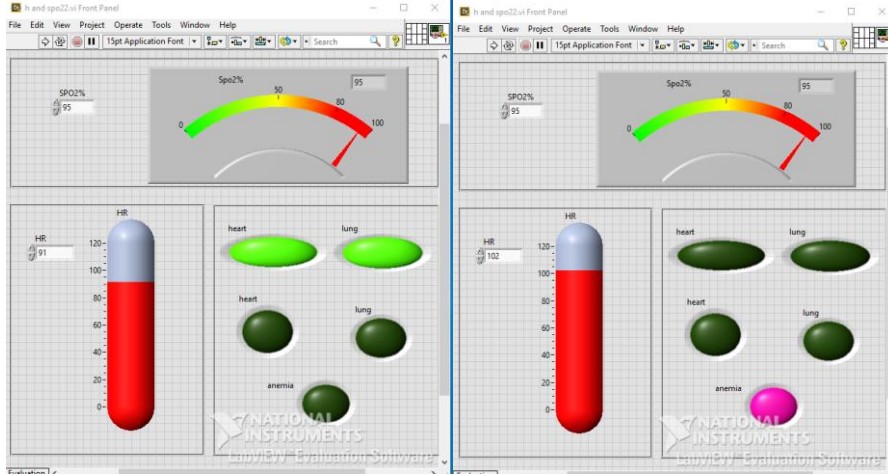
٤-٤ نتائج اختبار معدل نبضات القلب على الذكور:

يبين الشكل (١٥) المخطط البياني المعبر عن نتائج الاختبارات التي أجريت على مجموعة من الذكور بلغ عددهم سبعة مشاركين من مختلف الاعمار حيث تم تكرار الاختبار عدد من المرات بمعدل من ثلاث الى خمس اختبارات لكل مشارك على حدي وسجلت النتائج على شكل مخطط بياني يوضح اختلاف معدل ضربات القلب باختلاف العمر والحالة الصحية وهو ما يتوافق مع النتائج الواردة في الدراسات المرجعية التي تبين أن النسب الطبيعية لمعدل ضربات القلب هي بين ٦٠ و ١٠٠.



الشكل (١٥) منحني بياني للعلاقة بين النسبة المئوية لنسبة تشبع الأكسجين بالدم والعمر عند الذكور المشاركين في الاختبارات.

وبذلك كما نلاحظ من الشكلين السابقين ان نتائج الاختبارات كانت طبيعية عندما كان معدل نبضات القلب بين ٦٠ و ١٠٠ ونسبة تشبع الأكسجين بالدم بين ٩٤ و ١٠٠٪ ولكن كما نلاحظ في الاختبار على المشارك بعمر ٧٥ عاما ان معدل نبضات القلب ١٠٢ ونسبة تشبع الأكسجين بالدم ٩٥ % وهنا النظام يعطي انذار باحتمال وجود فقر دم كما هو موضح في الشكل (١٦) على واجهة الالافيو. كذلك نلاحظ الاختبار الذي اجري على المشارك بعمر ١٧ عاما بأن معدل ضربات القلب ٩١ ونسبة تشبع الأكسجين بالدم طبيعية ٩٥% وهنا النظام يعطي عبر الواجهة المصممة بأن وضع القلب والسررتين طبيعي كما يبين الشكل (١٧).



الشكل (١٦) واجهة لافيفو تعرض حالة القلب والرئتين. الشكل (١٧) واجهة لافيفو تعرض حالة القلب والرئتين.

٥- الخاتمة:

تم تصميم نظام مراقبة مرتكز على حساس Oximeter متكامل نوع MAX30102 لقياس نسبة تشبع الاوكسجين في الدم عن طريق تحسس كمية الاشعة الضوئية المنعكسة والامتصة عبر الاصبع حيث أن أي خلل في القياس يعطي تصور واضح عن وجود خلل أو حالة التهابية بالجهاز التنفسي وأيضاً تم قياس عدد وانتظام ضربات القلب تم العمل أيضاً على تزويد النظام المصمم بنظام انذار صوتي وضوئي في حال وجود خلل أو أي مضاعفات ضمن جسم المريض لتنبئه المستخدم سواء كان مختص أو غير مختص في حال وجود أي مشكلة في نسبة تشبع الأوكسجين بالدم أو عدد ضربات القلب أو انتظام ضربات القلب وتم تصميم واجهة تخاطبية باستخدام LabView تظهر حالة القلب والرئتين عند القيم المقاسة عبر النظام المصمم عن طريق مؤشرات مختلفة لكل من القلب والرئتين وهي نسبة الاشباع بالأوكسجين ومعدل ضربات القلب حيث بينت الدراسة على مجموعة من المتطوعين بلغ عددهم خمسة عشر متطوعاً متنوعين من حيث العمر بين ١٧ و ٧٥ عاماً والجنس ذكور واناث وكذلك لون الجلد وقد بينت النتائج ان النسبة الطبيعية لنسبة تشبع الأوكسجين بالدم تتراوح بين ٩٤٪ و ١٠٠٪ وأن معدل ضربات القلب الطبيعي يتراوح بين ٦٠ و ١٠٠ وهذه النتائج مطابقة للدراسات الطبية، لذلك أي قيمة مقاسة خارج النطاق الطبيعي عندها النظام المصمم يستجيب بإنذار ضوئي باللون الأحمر للقلب أو للرئتين أو توقع وجود فقر دم حسب الخلل المتوقع من القياس المأخوذ أما في حال كانت النسبة طبيعية بالنسبة للقلب والرئتين فيكون الضوء أخضر لكليهما.

٦- التوصيات:

- ١- توسيع النظام ليشمل قياسات إضافية مثل ضغط الدم وحرارة الجسم بهدف بناء نظام مراقبة صحي متكامل متعدد الحساسات.
- ٢- توسيع نطاق العينة التجريبية لتشمل فئات عمرية أوسع وخاصة الأطفال وكذلك أشخاص متنوعين من حيث لون البشرة (غامق-فاتح) لضمان موثوقية النتائج على نطاق سكاني أوسع.

المراجع:

1. Safar, H. (٢٠١٩). What are the arterial oxygen saturation discrepancies in some pediatric diseases and the risk. *Fayoum University Medical Journal*.
2. Yumrukuz, M., FIRAT, H., & KURT, E. (2020). Evaluation of transcutaneous carbon dioxide and saturation monitoring during fiberoptic bronchoscopy. *Tuberk Toraks*.
3. Jahan, E., Barua, T., Salma, U. (2020). an over view on heart rate monitoring and pulse oximeter system. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*.
4. Shi, C., Goodall, M., Dumville, J., Hill, J., Norman, G., Hamer, O., Clegg, A., Watkins, C., Georgiou, G., Hodkinson, A., Elizabeth, C., Paul, D. and Cullum, N. (٢٠٢٢). The accuracy of pulse oximetry in measuring oxygen saturation by levels of skin pigmentation: a systematic review and meta-analysis Shi et al. *BMC Medicine*.
5. Rakhmatsyah, A., Wardana, A. (2022). Detection of Oxygen Levels (SpO2) and Heart Rate Using a Pulse Oximeter for Classification of Hypoxemia Based on Fuzzy Logic. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*.
6. Marinari, S., Volpe, P., Simoni, M., Aventaggiato, M., Benedetto, F., Nardini, S., Sanguinetti, C., & Palange, P. (2022). Accuracy of a New Pulse Oximetry in Detection of Arterial Oxygen Saturation and Heart Rate Measurements: *The SOMBRERO Study*. *Sensors*.
7. Shapiro, I., Stein, J., MacRae, C., O'Reilly, M. (2023). Pulse oximetry values from 33,080 participants in the Apple Heart & Movement Study: *npj Digital Medicine* (2023) 6:134; <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00851-6>.
8. Helmer, P., Rodemers, P., Hottenrott, S., Leppich, R., Helwich, M., Kranke, P., Meybohm, P., Winkler, B., & Sammeth, M. (٢٠٢٣). Evaluating blood oxygen saturation measurements by popular fitness trackers in postoperative patients: A prospective clinical trial. *iScience*.