دي أن أي ـ كيمياء الحياة

الدكتور
عبد الرزاق حمودي القرغولي
وزارة العلوم والتكنولوجيا، بغداد \ العراق

الدكتور
اياد احمد الطويل
كلية الاسراء الجامعة، بغداد \ العراق

DNA - Chemistry of Life

Dr. Abdulrazzak Hammody Al-Qaraghuli
Ministry of Science and Technology,
Baghdad / Iraq

Dr. Ayad Ahmed Al-Taweel
Al-Esraa University College,
Baghdad / Iraq

E_mail: abdulrazzaka@yahoo.com

المستخلص

تتطرق هذه الدراسة للبنية الكيميائية لكل من الدنا والرنا والتيلوميرات والمايتوكوندريا ومكوناتها الرئيسية وطبيعة الأواصر الكيميائية فيما بينها. كما تم التطرق باختصار إلى طبيعة الكروموسومات والجينات وأعدادها في خلايا الإنسان وبعض الكائنات الحية. وفي مقاربة فيما يخص الطبيعة البوليميرية لجزيئة الدنا تمت الاشارة إلى أعداد الوحدات أو أعداد الجزيئات ضمن البوليمر استناداً إلى أبعاد وحدة الخلية في البنية البلورية لمادة الدنا. وتطرقت الدراسة أيضاً إلى آلية تخليق البروتينات داخل الخلية الحية ودور الدنا والرنا فيها.

الكلمات المفتاحية: كيمياء الدنا, كيمياء الرنا, التيلومير, المايتوكوندريا, الاحماض الامينية والبروتين.

Abstract

The chemical structure of DNA, RNA, Telomeres and Mitochondria and their principal components are reviewed on the basis of type of chemical bonds and types of interactions between those components. This study also outlines briefly types of chromosomes and genes in the cells of some living species including human. An approach regarding the polymeric nature of DNA is introduced in this study, including number of units or molecules in the polymer on the basis of unit cell dimensions of crystalline DNA material. Furthermore, the mechanism of protein synthesis inside the living cell including the role of DNA and RNA in this respect is discussed.

Keywords: DNA, RNA, Telomere, Mitochondria, Amino acids and Protein

المقدمة

تهدف هذه الدراسة لاستعراض الجوانب البنيوية (التركيبية) للمادة التي تتحكم في نقل المعلومات الوراثية للكائنات الحية وهي الحامض النووي الدنا. تلعب الحوامض النووية دوراً محورياً لخزن ونقل المعلومات الجينية بين الأجيال المتعاقبة، وهو شرط أساسي للحياة، كما ينظر إليها كمستودعات جزيئية للمعلومات الجينية. لذلك فإن فهم كيمياء الحوامض النووية (الدنا والرنا) ربما يساعد في الحصول على معرفة شاملة عن العمليات البيولوجية التي تحصل داخل الجسم على المستوى الجزيئي.

في عام 1944 صدر كتاب بسيط بعنوان "ما هي الحياة" تأليف عالم الفيزياء النظرية المشهور شرودنكر (Schrödinger, 1944) طرح فيه أفكاراً مهمة بأن الحياة يمكن النظر إليها من ناحية خزن وتمرير المعلومات البيولوجية. ولهذا فإن الكروموسومات هي ببساطة مواد حاملة للمعلومات. وحيث أنَّ كماً هائلاً من المعلومات معبئة في كل خلية حية، فإن هذه المعلومات يجب أن تكون مضغوطة في ما سمّاه شرودنكر "نص الشفرة الوراثية" ضمن النسيج الجزيئي للكروموسومات. ولكي نفهم الحياة ينبغي تشخيص هذه الجزيئات وتفكيك شفرتها. كما أنه خمّن بأن فهم الحياة والذي يتضمن بالضرورة تعيين الجينات، قد يأخذنا إلى ما وراء قوانين الفيزياء.

إن الكثير من العلماء الذي سيصبحون لاعبين أساسيين في مجال البيولوجيا الجزيئية من ضمنهم فرانسز كريك وجيمس واتسون كلاهما كان قرأ كتاب شرودنكر وتأثرا بالأفكار التي وردت فيه.

وفي بداية خمسينات القرن العشرين بدأ سباق علمي واسع لغرض التوصل للبنية الجزيئية لمادة الدنا. شمل هذا السباق علماء في مجال الكيمياء، البيولوجي، الفسلجه والطب. ومن بين هؤلاء العلماء لاينوس باولنك وهو كيميائي، موريس ويلكفنز، فيزيائي وفرانسز كريك، فيزيائي وجيمس واتسون، بيولوجي وروزالند فرانكلين، كيميائية، وآخرون. وحيث أن المكونات الأساسية لجزيئة الدنا كانت معروفة أصلاً، وهي مجموعة الفوسفات وسكر الرايبوز ناقص الأوكسجين وأربعة قواعد هي ادينين، ثايمين، كوانين وسايتوسين (C, G, T, A). لذلك تركزت البحوث نحو معرفة ترتيب هذه الجزيئات وأنواع الأواصر فيما بينها ضمن جزيئة الدنا. وكانت الأدلة الكيميائية تشير إلى أن القواعد يجب

أن ترتبط مع بعضها من خلال أواصر هيدروجينية. كما أظهرت معطيات حيود أشعة X – لجزيئة الدنا بأن هذه الأواصر يمكن أن تتكون فقط عندما تكون القواعد الأربع متواجدة في مركز الجزيئة.

وفي نيسان 1953 نشر واتسون وكريك بحثهما الأول في مجلة (Nature) (Watson and Crick, 1953) لبنية الدنا تضمّن ملامح أصيلة لبنية الجزيئة يمكن أن توفر أفكاراً جديدة للباحثين في مجال البيولوجيا الجزيئية. كما وفر هذا الاكتشاف مجالاً جديداً للبحث والتطوير فيما يخص حياة الإنسان وفي مجال الطب وعلاج الأمراض ودراسة الأجناس وهجرة الإنسان عبر القارات خلال مئات الآلاف من السنين. كما أن المشروع الضخم، مشروع الجينوم البشري (HGP) الذي شاركت فيه عدة دول واستغرق حوالي خمسة عشر سنة (1988 – 2003)، لم يكن بالإمكان تحقيقه بدون معرفة بنية جزيئة الدنا. إن الشكل اللولبي المزدوج (double helix) أصبح البنية الجزيئية الأكثر شهرة في العالم. حيث أن الـدنا هو الجزيئة الوحيدة المعروفة بقدرتها على إعادة إنتاج نفسها وموجودة في جميع الكائنات الحية. فالـدنا هو حقاً جوهر الحياة.

DNA (Deoxyribose Nucleic Acid)

تتكون جزيئة الدنا من تركيب لولبي مزدوج (ظفيره) تشبه شكل درج أو سلم لولبي مزدوج، ويتكون جزئي الضفيرة في اللولب المزدوج (double helix) من سلسلتين ملتفتين حول المحور العمودي وترتبطان بواسطة أزواج من القواعد. يحتوي الدنا على أربع قواعد هي ادنين وكوانين وهما من البيورينات (purines) وثايمين وسايتوسين وهما من البيريميدينات (pyrimidine)، الشكلين (1 و2). وترتبط كل قاعدتين مع بعضهما بأواصر هيدروجينية بحيث يرتبط الادينين (A) دائماً مع الثايمين (T) بآصرتين هيدروجينية، والكوانين (G) يرتبط دائماً مع السايتوسين (C) بثلاث أواصر هيدروجينية مكونة ما يشبه عتبات السلم اللولبي المزدوج، (Watson and Crick, 1953) الأشكال (3، 4، 5).

ترتبط كل مجموعة فوسفات في أحد جزئي اللولب المزدوج بجزيئة الرايبوز ناقص الأوكسجين ضمن عتبة السلم اللولبي التي فوقها ويكون موقع الارتباط عند ذرة الكاربون رقم 5'، وفي نفس الوقت ترتبط بالعتبة التي تحتها عند ذرة الكاربون 3'. بينما ترتبط

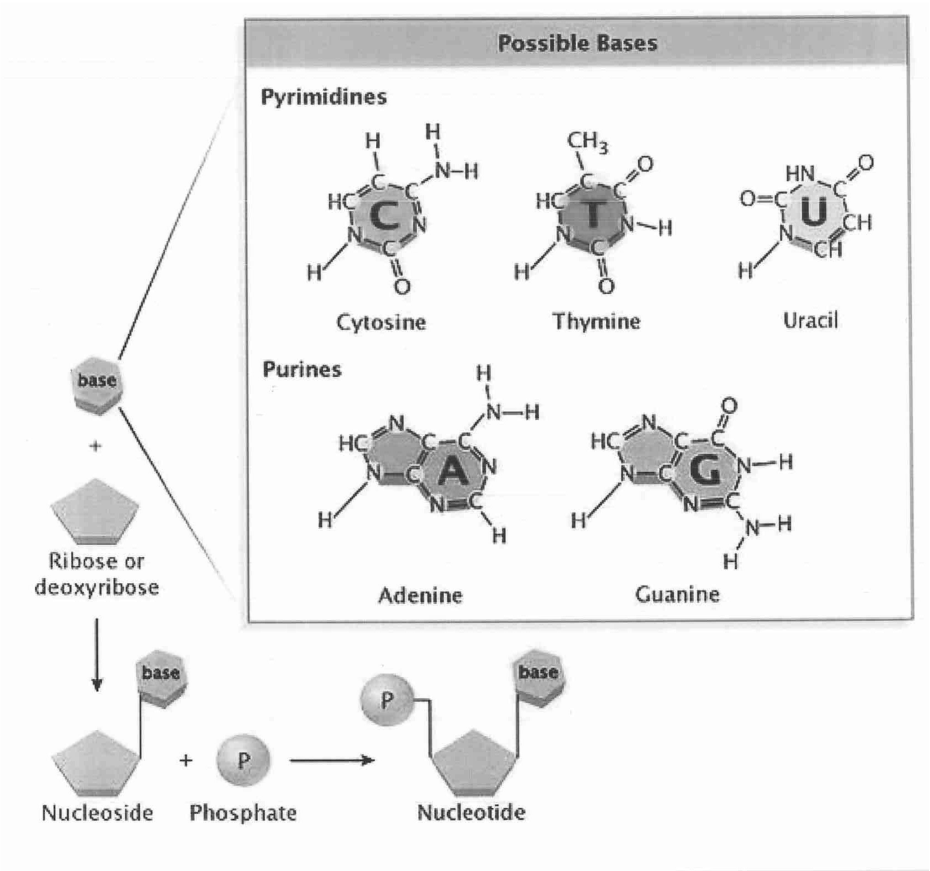
مجموعة الفوسفات في الجزء المقابل من اللولب المزدوج بذرة الكاربون رقم 3' في العتبة التي فوقها وفي نفس الوقت ترتبط بالعتبة التي تحتها عند ذرة الكاربون رقم 5'، بمعنى أن جزئي اللولب المزدوج يتجهان باتجاهين متعاكسين (Watson and Crick, 1953) (انظر الشكلين 3 و4). إن الارتباط القوي بين مجموعات الفوسفات وجزيئات سكر الرايبوز ناقص الأوكسجين يتم من خلال أواصر تساهمية قوية ويكون هذا الارتباط بمثابة العمود الفقري الضامن لتماسك جزيئة الدنا.

ولتوضيح كيفية تكون اللولب المزدوج فإن الزاوية بين عتبات السلم وكل من جانبي الضفيرة ليست عمودية بل إن الزاوية بين أزواج القواعد مع جانبي الضفيرة هي 36°، مما يجعل جانبي الضفيرة يلتفان بشك حلزوني (لولبي). وهذا يفسر سبب التفاف الـدنا بشكل حلزوني، كما يفسر وجود عشرة أزواج من القواعد لكل لفة كاملة (360°)، كما يفسر وجود الأخاديد (grooves) الرئيسية والثانوية على طول اللولب المزدوج. وبناءً على ذلك فإن عشرة من عتبات السلم اللولبي المزدوج تشكل لفة كاملة (360°) بمسافة 3.4 نانومتر، بمعنى أن الوحدات (اللفات) تتكرر كل 3.4 نانومتر على طول المحور العمودي. الشكل (4).

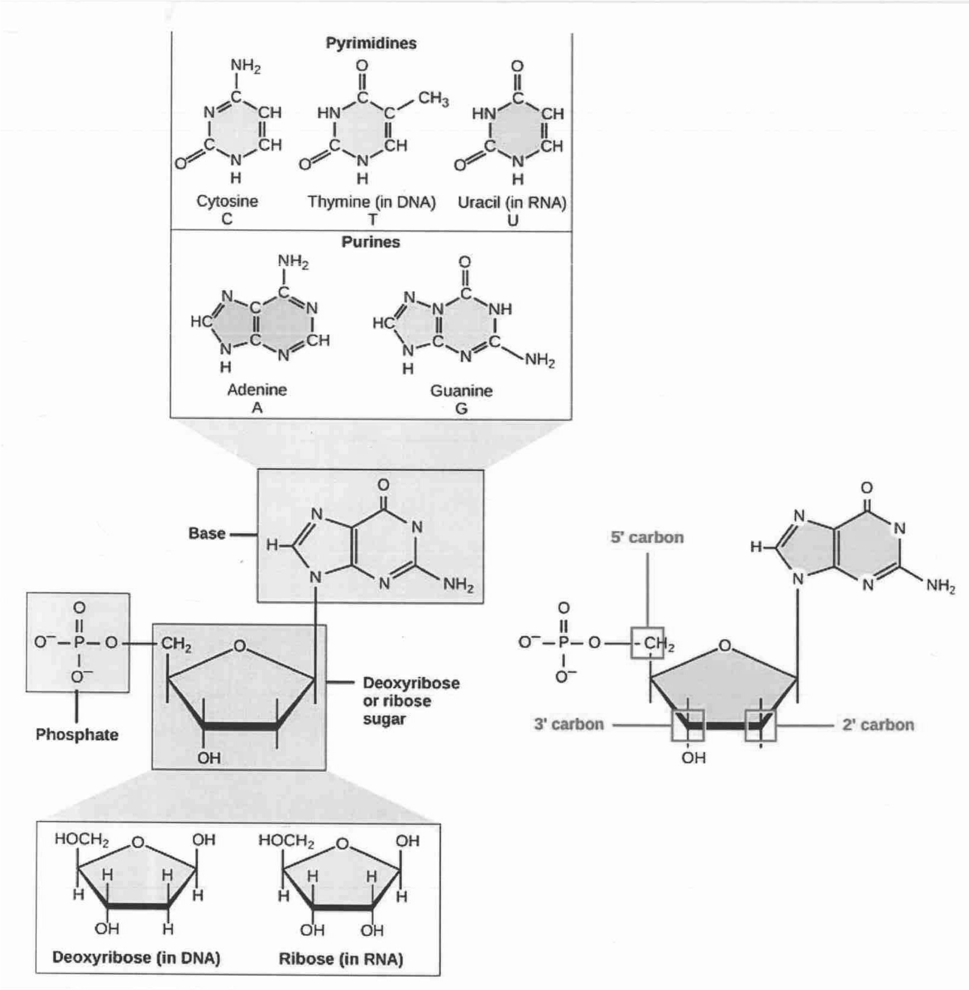
ولمزيد من الإيضاح فلا بأس من التكرار، إذ يتكون جانبي اللولب المزدوج من مجموعتي سكر – فوسفات تتجهان باتجاهين متعاكسين. وبتعبير كيميائي، وبموجب ترقيم الذرات في جزيئة الرايبوز ناقص الأوكسجين يشار إليها (5' إلى 3') باتجاه أحد جزيئي الضفيرة و(3' إلى 5') بالاتجاه المعاكس لجزء الضفيرة الآخر. والسبب الوحيد لذكر ذلك هو أن معظم المصادر عند رسم تفاصيل بنية الـدنا ومواقع القواعد فيها، يذكر عادةً الاتجاه (5' إلى 3'). وأصبح معروفاً إذا رأينا تتابعات (sequences) مثل (GAATTC) في أي كتاب أو بحث يعني بالضرورة (5' GAATTC 3'). فالجزء المكمل الآخر للضفيرة لا يظهر عادة في السياق ولكن يفهم بأنه لابد أن يكون (3' GAATTC 5'). (McHugen, 2020)

بالنسبة للإنسان يتكون الـدنا من حوالي 3.1 مليار ارتباط للسلسلة الجينية. وبهذا المعنى فإن كل ارتباط يعرف بالنوكليوتايد ويتألف من العمود الفقري للسلم اللولبي، أي مجموعة الفوسفات مرتبطة بسكر الرايبوز ناقص الأوكسجين، والتي ترتبط بدورها بأي من القواعد الأربع A، T، C أو G. وبذلك نحصل على تتابع معين في الـدنا مثل

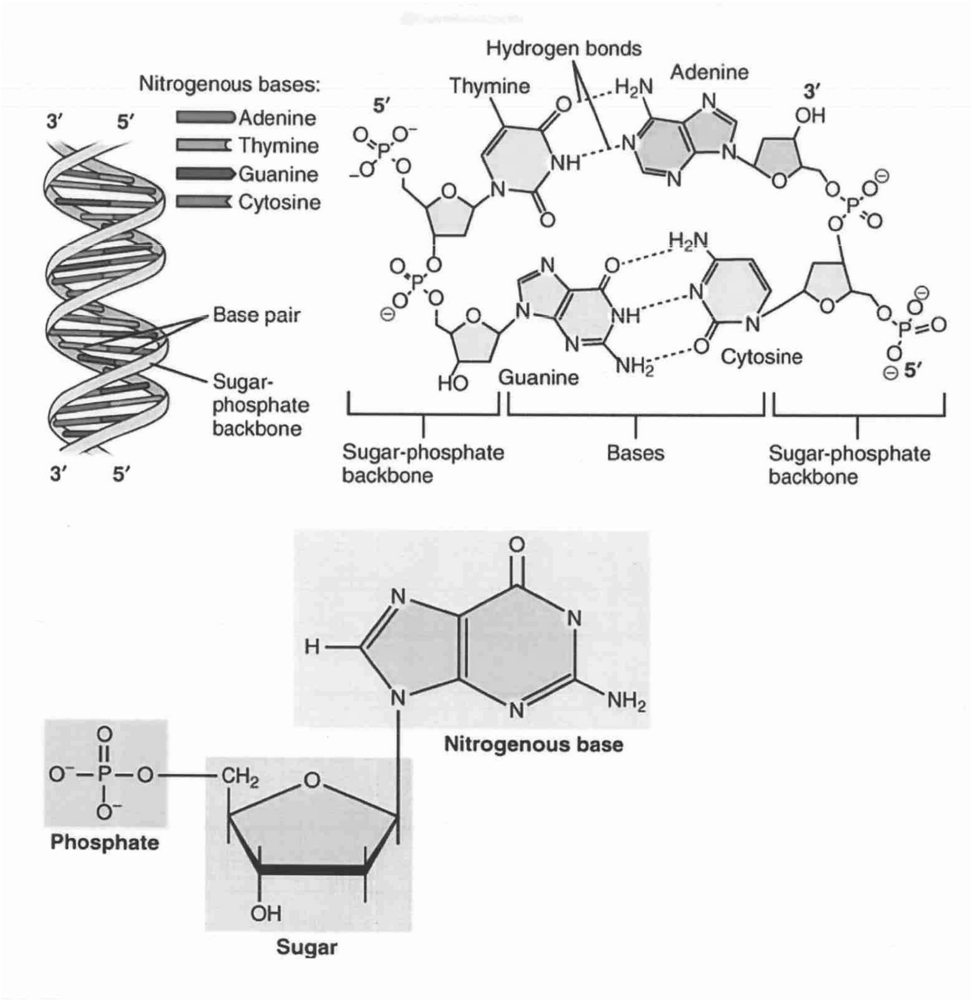
(GATTACA). ولأن كل ارتباط لسلسلة الــدنا يتألف من العمود الفقري والقواعد الأربع، كما أسلفنا، إلاّ أن تركيبة العمود الفقري لا تظهر عادة في تتابعات القواعد، ولكن يُفهم بأنها موجودة في جميع الأحوال، مثلما لا تظهر أزواج القواعد المكملة لذلك التتابع. فمثلاً التتابع القصير (GATTACA) يفهم منه بأنه مرتبط بالعمود الفقري المتكون من سكر - فوسفات، وكل قاعدة يفهم بأنها مرتبطة بالقاعدة المقابلة لها في جزء الضفيرة المقابل، أي (CTAATGT). (McHugen,2020)



الشكل (1) المكونات الأساسية لكل من الدنا والرنا
(Encyclopedia Britannica,2015)

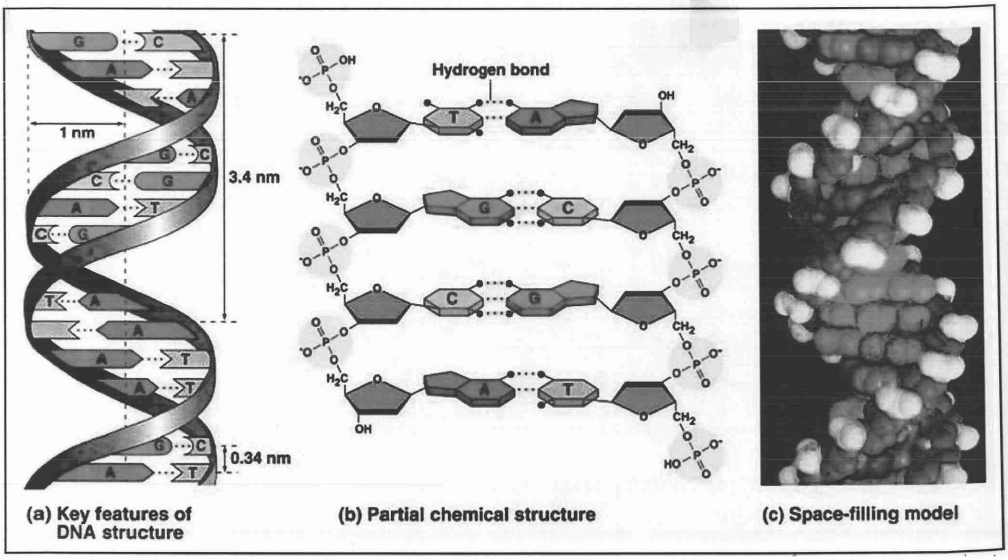


الشكل (2) سكر الرايبوز والرايبوز ناقص الاوكسجين
ومواقع ارتباط الفوسفات والقواعد فيهما
(Encyclopedia Britannica,2015)

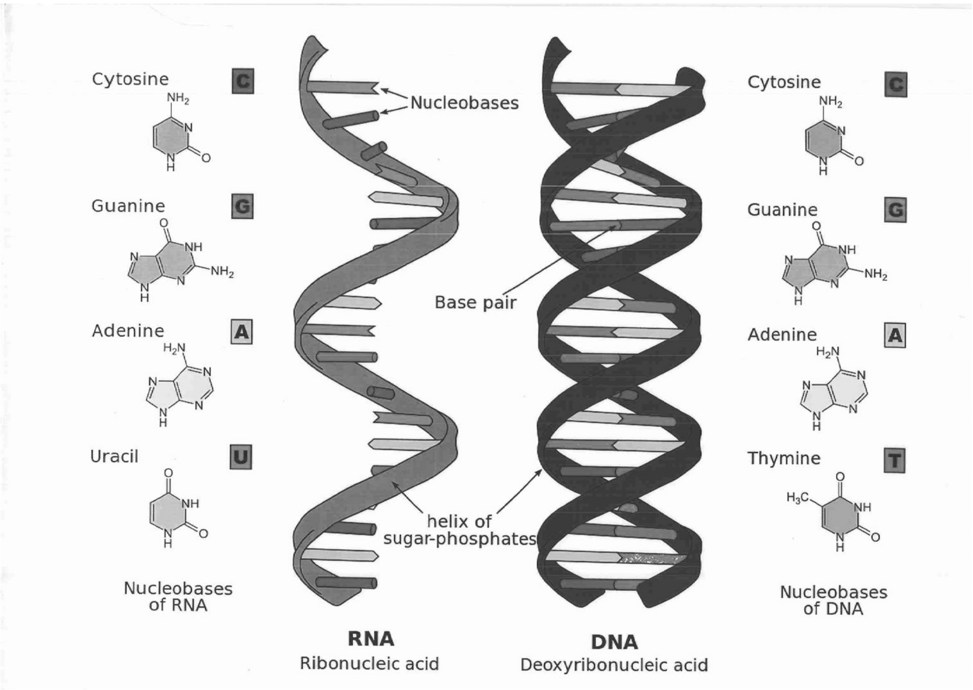


الشكل (3) الأواصر الهيدروجينية بين أزواج القواعد والأواصر التساهمية بين مجموعة الفوسفات والرايبوز.

(Encyclopedia Britannica,2015)



الشكل (4) البنية الكيميائية لجزيئة الدنا (Encyclopedia Britannica,2015)



الشكل (5) الدنا والرنا (Encyclopedia Britannica,2015)

وفي الحقيقة أن جزيئة الدنا هي عبارة عن بوليمر (polynucleotide) الوحدة الأساسية فيه هي النيوكليوتايد والذي يتألف من سكر الرايبوز ناقص الأوكسجين ترتبط به مجموعة فوسفات عند ذرة الكاربون رقم 5 وإحدى القواعد الأربع عند ذرة الكاربون رقم 1 من خلال أواصر تساهمية قوية، (الشكلين 2، 3). وبمعنى آخر فإن البوليمر يتألف من 3.1 × 109 وحدة نيوكليوتايد.

أظهرت دراسة حيود أشعة X – لمادة الدنا المتبلورة بأن وحدة الخلية هي أحادي الميل (monoclinic) بالأبعاد الآتية. (Olby, 1994)

a = 2.20 nm

b = 3.98 nm

c = 2.81 nm

β = 96.5o

ρ = 1.63 - 1.65 g/cm3 (الكثافة)

وتحتوي مادة الدنا المتبلورة على حوالي 20% وزناً من الماء، وإن مجموعات الفوسفات فيها تعتبر الجزء الأكثر قطبية في تركيب جزيئة الدنا، لذلك فإنها ترتبط مع بعضها وكذلك مع جزيئات الماء. كما تعتبر أواصر فوسفات – فوسفات هي المسؤولة عن الارتباط القوي بين الوحدات ضمن التركيب البلوري، كما أن جزيئات الماء تتجمع حول هذه الأواصر بمقدار (4H2O) لكل ذرة فسفور. (Olby, 1994)

الجينوم – الكروموسومات والجينات

الجينوم هو مجموعة التعليمات الجينية في نواة كل خلية حية، وكل خلية تحوي اثنين من الجينوم كل واحد يورث من أحد الوالدين. وإن العدد الكلي للكروموسومات في نواة كل خلية بشرية هو 46 بمجموعتين كل مجموعة (23 كروموسوم) موروثة من أحد الوالدين. لذلك فإن الجينوم البشري يمثل احدى المجموعتين، بمعنى أنه يمكن أن ينظر إليه بمثابة جزيئة دنا طويلة جداً تتألف من 23 قطعة. الشكل (6) يبين الكروموسومات الثلاثة والعشرين التي تختلف عن بعضها بالحجم، أكبرها هو كروموسوم رقم 1 وأصغرها كروموسوم رقم 21 وكروموسوم رقم 22.

الكروموسوم عبارة عن حزم أو قطع كبيرة جداً من دنا ملفوفة حول نفسها وأيضاً حول قطع من البروتينات وتلتف مرات أخرى بشكل حلزوني حتى تأخذ شكلها المعروف (الشكل 6). كما أن قطع الكروموسومات هي في الحقيقة منفصلة عن بعضها فيزيائياً. وتجدر الإشارة إن الذكر يملك كروموسوم Y وكروموسوم X، بينما تمتلك الأنثى زوج من كروموسوم X. بمعنى أن الأنثى تستقبل كروموسوم X واحد من الأب وآخر من الأم، بينما يستقبل الذكر فقط كروموسومي Y من الأب.(Rutherford, 2017)

ويمكن تعريف الجين بأنه تتابع (sequence) معين من الــدنا يقوم بتشفير بروتين معين. وتتألف الجينات من جزيئات (وحدات) الدنا وتعتبر جزء من الكروموسومات، مثل جمل في مقال أو في كتاب. وجدير بالذكر أنه لا ينتج عن كل الــدنا في الخلية جينات، بل إن أغلب مادة الدنا عبارة عن ركام من العبارات أو التتابعات المتكررة التي نادراً ما تنسخ (أي لا تقوم بالتشفير Coding) أو ربما لا تنسخ مطلقاً (Non-coding)، وهو ما يطلق عليه اسم الدنا المهمل. الجينات ليست وحدات منفصلة فيزيائياً، بل إنها مقاطع من الــدنا لها وظائف معينة، أي إنها عبارة عن تتابعات محددة للقواعد في الــدنا.

يبين الشكل (7) ماذا نعني عند الحديث عن الــدنا في سياق الكلام، بينما يوضح الشكل (8) كيف يُعبأ الكروموسوم بالــدنا وإن الجين هو عبارة عن مقطع من اللولب المزدوج للــدنا.

إن البشر جميعاً متشابهون جينياً بشكل كبير، إذ يتشارك الجميع بحوالي 99.9% من تتابعات القواعد في الــدنا. لذلك فإن الاختلافات الجينية بين شخصين تعزي فقط إلى 0.1% من الــدنا في كل منهما. ومع ذلك فإن الاختلافات الجينية، رغم ضآلتها، يمكن أن تترتب عليها آثار كبيرة. فتتابعات الــدنا تحدّد نوع فصيلة الدم، لون الشعر، لون العين، لون البشرة...الخ. كما يترتب عليها أيضاً ما إذا كان الشخص أقل أو أكثر عرضة لبعض الأمراض مثل بعض أنواع السرطان، أمراض القلب، بالإضافة لأكثر من مئتي حالة أخرى متعلقة بالصحة. (McHugen, 2020)

يختلف عدد أزواج القواعد وعدد الجينات في كل كروموسوم عن غيره، فكروموسوم رقم 1 لديه أكبر عدد من الجينات (250 مليون زوج من القواعد وحوالي 2000 جين) يليه كروموسوم رقم 2 (240 مليون زوج من القواعد وحوالي 1300 جين)، وهكذا وصولاً إلى

أصغر الكروموسومات وهما رقم 21 ورقم 22، حيث يحتوي الكروموسوم رقم 21 على (47 مليون زوج من القواعد ولديه 234 جين)، والكروموسوم رقم 22 الذي يحوي (50 مليون زوج من القواعد ولديه 480 جين).

إن جميع الكائنات الحية (الإنسان، الحيوان والنبات) تتكون من خلايا وجميع الخلايا تحوي نواة في كل منها والتي بدورها تضم مجموعة الجينات في الـدنا (الجينوم) الضروري لبناء الكائن الحي. وللتوضيح مثلاً، فإن جينات إنزيمات الكبد موجودة أيضاً في دنا خلايا الجلد وخلايا العضلات وخلايا الدماغ، وفي جميع أنواع الخلايا الأخرى لكنها تكون فعّالة وتؤدي وظيفتها فقط في خلايا الكبد. وهكذا الحال بالنسبة لجميع الأعضاء الأخرى. (McHugen, 2020)

إن معظم الدنا في الأنواع الراقية (الإنسان، الحيوان والنبات) لا ترتبط أبداً بأي نوع من جينات الترميز (التشفير). وفي الحقيقة إن حوالي 2 – 3% من الـدنا في الجينوم البشري هي جزء من وصفة جينية لصنع بروتين معين. يعمل الـدنا كجزيئة حاملة للمعلومات وفي نفس الوقت يعمل كمنصة تصطف عليها الجينات، إذ لابد من ربط الجينات المتناثرة مع بعضها.

ومن المدهش فإن 50% من الجينوم البشري يتألف من امتدادات طويلة من تتابعات القواعد للـدنا تتكرر بالتزامن وليست لها مهام تشفيريه أو وظائف واضحة. هذه التتابعات ليست مفهومة تماماً، لكنها تبدو مهمة لأنها موجودة في جينوم الكثير من الأنواع الراقية من الكائنات الحية. كما يمكن أن يُنظر إليها بمثابة ركائز توفر استقراريه فيزيائية لبنية جزيئة الـدنا. وجدير بالذكر فعند اكتشاف التتابعات غير الجينية المذكورة أعلاه في بادئ الأمر، سُمي بالـدنا المهمل (Junk DNA) بسبب عدم وجود وظائف واضحة لها ولعدم حملها لمعلومات ترميز محددة. والمستقبل سيكون حافلاً بالمفاجئات التي ستؤدي للتعرف على وظائف جميع تلك التتابعات غير الجينية.

إن مشروع الجينوم البشري (HGP) هو مشروع عالمي تم تنفيذه وتمويله من قبل العديد من دول العالم لغرض تسجيل جميع أحرف (قواعد) الـدنا حرفاً حرفاً، والذي يسميه العلماء تتابعات الجينوم. وقد استغرق العمل فيه حوالي (15) عام (1988 – 2003) بكلفة إجمالية حوالي (3) مليار دولار. والآن (2020) مع التطور التكنولوجي وزيادة

كفاءة العمل، أصبح بالإمكان تسجيل جميع تتابعات الجينوم البشري خلال فترة 18 دقيقة تقريباً وبكلفة مئات قليلة من الدولارات. (McHugen, 2020)

وتحتوي كل خلية في جسم الإنسان على حوالي 21000 جين موزعة على 23 كروموسوم وعدد الجينات يختلف بين الكائنات الحية، كما مبين في الجدول رقم (1).

تحتوي نوى الخلايا المختلفة لأي نوع معين من الكائنات الحية نفس الكمية من مادة الدنا، بينما تحتوي البيوض والحيامن لهذه الكائنات على نصف كمية الدنا الموجودة في الخلايا الاعتيادية. وقد ثبت عملياً أنه خلال عملية استنساخ الدنا يتم استنساخ جزئي الضفيرة كلاهما بالتزامن لإنتاج جزيئات جديدة (Rutherford, 2017)، الشكل (9).

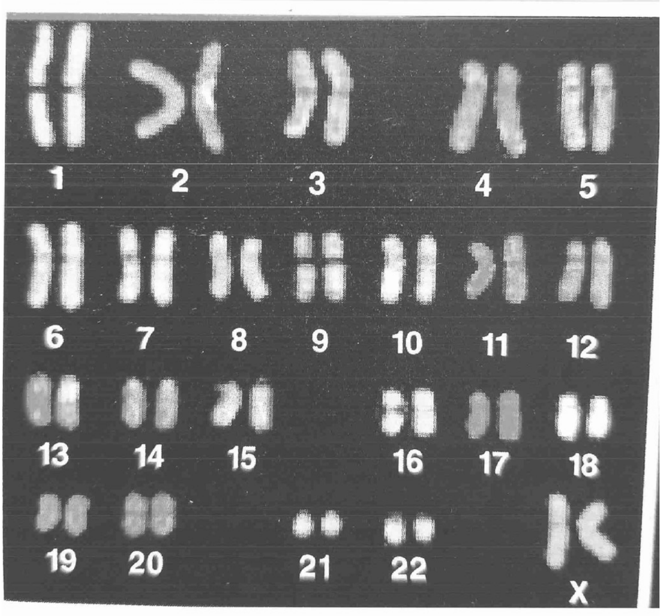
ومن قياسات كمية الدنا في خلية واحدة أمكن تقدير عدد أزواج القواعد (base pairs) في الجينوم البشري (أي نصف محتوى الدنا في نواة خلية واحدة) بحوالي 3.0 – 3.2 (المعدل 3.1) مليار زوج من القواعد، أو بتعبير آخر 3.1 مليار عتبة من عتبات السلم اللولبي المزدوج.

إن المسافة بين كل عتبتين من عتبات السلم اللولبي المزدوج هي 0.34 نانومتر، وحيث أن هناك ما يقارب 3.1 مليار عتبة في السلم، فيمكن حساب طول جزيئة الدنا في نواة الخلية كما يلي:

$0.34\times3.1\times10^{9} = 1.06 \times 10^{9}$ نانومتر = 1.06 متر (1 نانومتر = 10^{-9} متر)

وحيث أن الجينوم يتكون من صفين من الدنا أحدهما يعود للأم والآخر يعود للأب، لذلك فإن طول جزيئة الدنا = $1.06 \times 2 = 2.12$ متر.

بمعنى أن طول جزيئة الدنا الموجودة في نواة الخلية الواحدة في جسم الإنسان حوالي 2.12 متر، وهو أمر عجيب حقاً، فلكي تتجمع في نواة الخلية (المجهرية) لابد لها أن تُرص رصاً محكماً وتلتف حول نفسها بكفاءة عالية في حدود الفراغ المتاح ضمن نواة الخلية.



الشكل (6) الكروموسومات الموجودة في كل خلية في جسم الإنسان وعددها 46 بمجموعتين، كل مجموعة تحتوي 23 كروموسوم موروثة من أحد الوالدين.
ملاحظة: تم تلوين الكروموسومات لأغراض تجميلية (Watson, 2017).

الجدول (1) أعداد الجينات لمجموعة من الكائنات (Watson, 2017).

اسم الكائن	عدد الجينات
الإنسان	21000❋
نبات الخردل	27000
الدودة الخيطية	20000
ذبابة الفاكهة	14000
خميرة الخبز	6000
بكتريا الأمعاء (*E. coli*)	4000

(❋) رغم التقدم الهائل الذي حصل خلال النصف الثاني من القرن العشرين والذي تكلل بإكمال مشروع الجينوم البشري (HGP)، إلاّ أن وظائف معظم الجينات لا تزال غير معروفة.

إن لفّات السلم اللولبي المزدوج في بنية الدنا تتكرر كل عشرة أزواج من القواعد (الشكل 4)، فيمكن اعتبار الدنا بمثابة بوليمر تكون الوحدة الأساسية فيه متألفة من عشرة أزواج من القواعد بما يكافئ 3.4 نانومتر على المحور العمودي (b) لوحدة الخلية البلورية، بمعنى أن عدد جزيئات (وحدات) الدنا في البوليمر يساوي:

$$\frac{3.1\times10^{9}}{10} = 3.1 \times 10^{8}$$ جزيئة (وحدة)

وبذلك أصبح لدينا تعريفان للـدنا كمادة بوليميرية، أولاً بولينوكليوتايد بعدد وحدات يساوي 3.1×10^{9} وثانياً بوليمر بعدد جزيئات يساوي 3.1×10^{8} جزيئة.

وجدير بالذكر فإن مقاربة كون جزيئة الدنا تتألف من عشر عتبات في السلم اللولبي المزدوج تنسجم مع أبعاد وحدة الخلية (unit cell dimensions) لمادة الدنا البلورية المذكورة في اعلاه، إذ أن أطول محاور وحدة الخلية هو المحور (b) وهو 3.98 نانومتر.

إن أزواج الكروموسومات الثلاثة والعشرين في نواة الخلية البشرية تحتوي على كمية من الـدنا متكونة من 3.1 مليار زوج من القواعد و3.1 مليار زوج فوسفات و3.1 مليار زوج سكر الرايبوز ناقص الأوكسجين، مجموع أوزانها الذي يشكل وزن الـ DNA في نواة الخلية الواحدة يساوي 3.5 بيكوغرام تقريباً. (1 بيكوغرام = 10-12 غرام) (McHugen,2020).

إن قـراءة الدنـا هـو فـي الحقيقـة نوع مـن التشـريح علـى المقيـاس الجزيئي. وجديـر بالذكـر فـإن اختـراع التكنولوجيـا لقـراءة الدنـا قـد وُجد أساسـاً نتيجـة رغبة العلمـاء لفهـم الأمـراض ولكـن سـرعان ما تبيـن أن فـك شـفرة الجينوم سـيمكنهم من التعـرف علـى تأريخ الإنسـان أيضاً. فتتابـع القواعد في جزيئـة الدنا هو بمثابة الشـفرة التي تحمل جميع المعلومات الجينية.

تحصل الاختلافات في تتابعات القواعد كل مئة زوج من القواعد تقريباً في الـدنا الذي يضم الجينات وكذلك في الـدنا "المهمل"، ويدرس علماء الأجناس هذه الاختلافات لدراسة ماضي الإنسان وهجراته. ومن بين حوالي الثلاث مليارات زوج من القواعد في الجينوم البشري هناك تقريباً ثلاث ملايين اختلاف في الجينوم لشخصين لا علاقة قرابة بينهما. (Reich) (انظر الشكل 9).

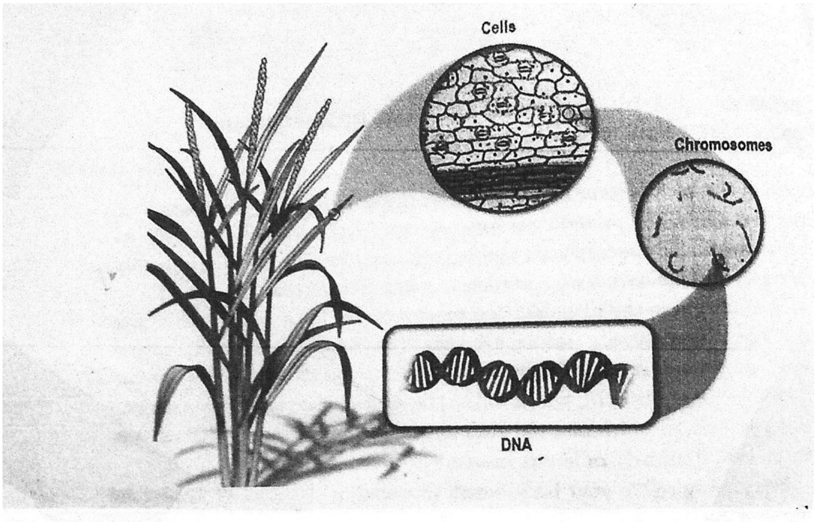
التيلوميرات Telomeres

تقاس التيلوميرات بوحدات الـدنا (أزواج القواعد)، وتكون بشكل قبعات صغيرة في نهايات الكروموسومات كما في الشكل (10). وتتكون ضفيرة التيلومير من ستة تتابعات متكررة (TTAGGG) في أحد جزئي الضفيرة مع مكمّلاتها في الجزء المقابل من الضفيرة (AATCCC). وترتبط كل قاعدة كما هي الحال دائماً، بسكر الرايبوز ناقس الأوكسجين والذي بدوره يرتبط بمجموعة فوسفات لتكوين مجموعة نيوكليوتايد. وكلما كان تكرار هذه التتابعات أكثر كانت التيلوميرات أطول.

إن تركيبـة الكروموسـومات هـذه بـكل تفاصيلهـا ضرورية جـداً لحماية الــدنا أثنـاء عمليـة انقسـام الخلية الحيـة. كمـا أن التتابعـات المتكـررة للتيلوميـرات تجعلها مختلفـة عـن التتابعـات فـي الجينات ضمـن بنية الــدنا. فإن دنـا التيلوميـرات يختلف عـن بقيـة الدنـا، أولاً أنهـا لا تقـع داخـل تركيبـة أي مـن الجينات بـل إنها تقـع خارج جميـع الجينـات، أي خـارج الكروموسـومات التـي تضـم الجينـات. لذلك فهـي لا تعمل كشـفرة وراثيـة (جينية) بـل إنها تعمل كحاجـز فيزيائـي لحماية الكروموسـومات أثناء عملية انقسام الخلية.

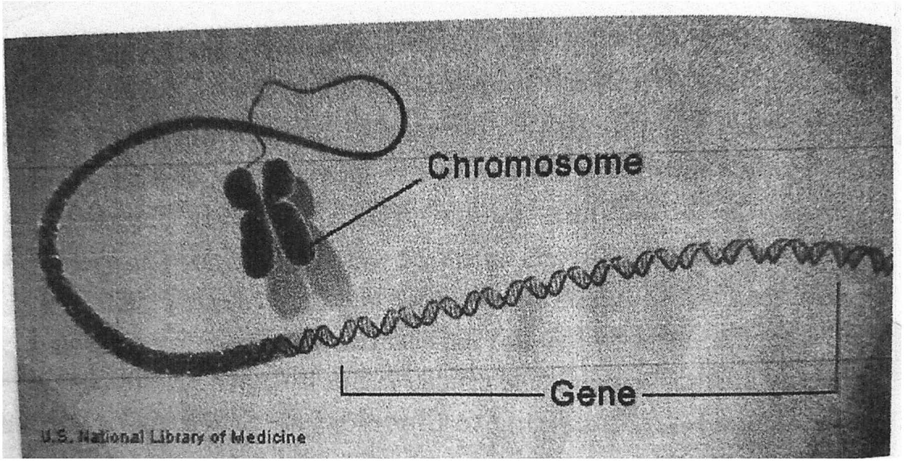
تصبح التيلوميرات أقصر وأقصر مع مرور الزمن، وفي ما يلي المسار النموذجي التقريبي لحياة التيلوميرات البشرية مع تقدم العمر (Blackburn and Epel, 2017):

العمر	طول التيلوميرات (أزواج القواعد)	عدد تكرار التتابعات الستة
طفل حديث الولادة	10000 زوج من القواعد	1660
35 سنة	7500 زوج من القواعد	1250
65 سنة	4800 زوج من القواعد	800

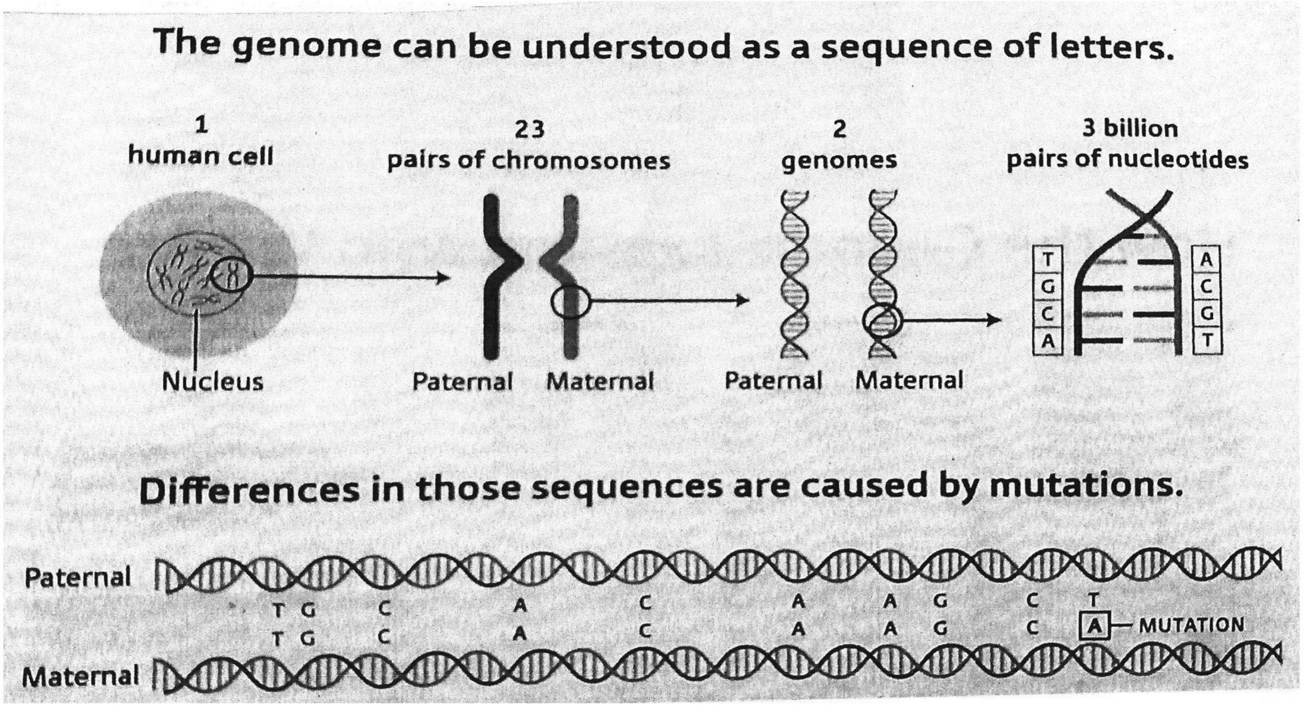


الشكل (7) ماذا نعني عند الحديث عن الـدنا في سياق الكلام.

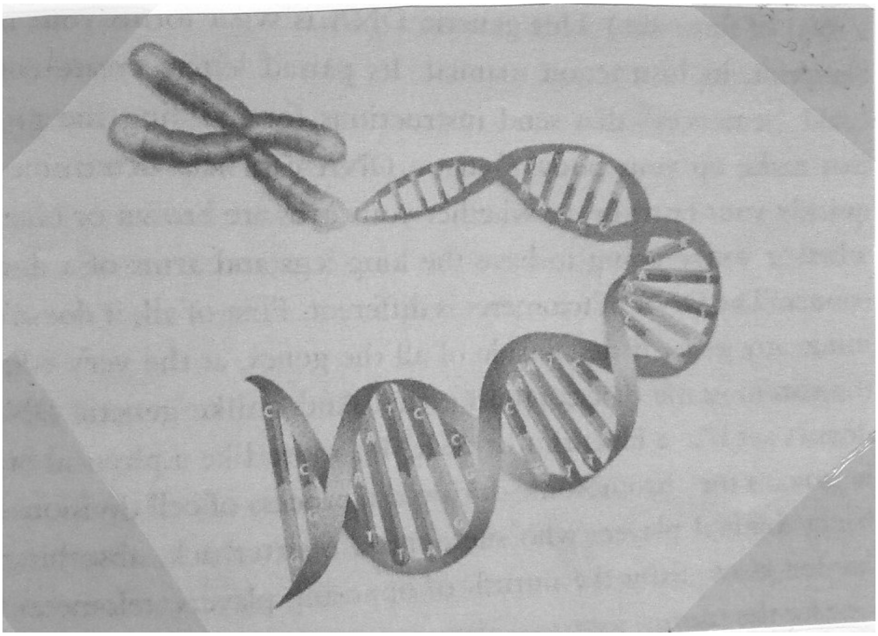
عندما نقوم بخطوات تكبير متعاقبة لنبات الرز في يسار الصورة، نرى أولاً مجموعة من خلايا ورقة الرز، ثم داخل نواة الخلية، الكرموموسومات، وأخيراً الـدنا داخل الكروموسوم. (McHugen, 2020).



الشكل (8) يوضح كيف يعبأ الكروموسوم بالـدنا وإن الجين هو عبارة عن مقطع من اللولب المزدوج للـدنا. (McHugen, 2020).



الشكل (9). يحتوي الجينوم حوالي 3 مليار زوج نيوكليوتايد والتي يمكن تصورها كأربعة حروف (قواعد) بأبجدية بيولوجية. حوالي 99.9% من هذه الحروف متشابهة عبر صفين من الجينوم أحدهما يعود للأم والثاني يعود للأب، ولكن هناك اختلاف في العُشر بالمئة الأخير تعكس التحويرات أو الطفرات الوراثية (Mutations)، والتي تتراكم بمرور الزمن. تخبرنا هذه التحويرات عن درجة القرابة بين أي شخصين وتسجل الكثير من المعلومات الدقيقة عن الماضي. (Reich, 2018).



الشكل (10) اللولب المزدوج لـدنا التيلومير. تتكون ضفيرة التيلومير من تتابعات متكررة لستة قواعد (TTAGGG) في أحد جزئي الضفيرة مع مكملاتها (AATCCC) في جزء الضفيرة المقابل. كلما تكررت هذه التتابعات تزداد أطوال التيلوميرات. وفي الحقيقة فإن النهايات الثلاث الأخرى للكروموسوم المبين في الشكل تحوي نفس التتابعات المتكررة لكنها غير ظاهرة في الشكل.

تحليل الـدنا

إن عملية تحليل الـدنا تعني التحقق من بنية الـدنا وتشمل الجوانب الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. كما إن تعيين التتابعات في الـدنا يعني تسجيل جميع القواعد في مقطع منه أو حتى في الجينوم بأكمله. وهناك تقنيات متعددة يمكن بواسطتها تعيين التتابعات في الجينوم ولكن لا توجد تقنية واحدة بإمكانها تسجيل أو قراءة جميع القواعد، حرف بعد حرف من البداية وحتى النهاية. وبدلاً من ذلك، تعتمد جميع الطرق المتوفرة عملياً على تعيين التتابعات لمقاطع قصيرة من الجينوم (الدنا) ومن ثم ربطها مع بعضها لتجميع الجينوم كاملاً. علماً بأن مشروع الجينوم البشري (HGP) لم يتمكن من تعيين جميع التتابعات في الـدنا مرة واحدة وإنما قراءة التتابعات لمقاطع قصيرة وتسجيلها وصولاً إلى جميع التتابعات في الجينوم.

ولحسن الحظ فإن تحليل جميع التتابعات في الجينوم غير ضروري لأن 99.9% من تتابعات الــدنا متشابهة في جميع البشر. وبكلمة أخرى فإن 0.1% فقط من الجينوم تختلف من شخص لآخر، وبناءً على ذلك فإن جميع طرق التحليل المعمول بها تعتمد على تعيين التتابعات في 0.1% من الــدنا والتي تضم الاختلافات في التتابعات الجينية للتمييز بين شخص وآخر.

اعتمد العالم (McHugen,2020) ثلاثة اختلافات للمقارنة بين طريقة بصمة الاصابع وطريقة تحليل الدنا وهذه الاختلافات هي:

1 – تعتمد طريقة بصمات الأصابع على مواقع محددة وهي نهايات أصابع باطن البدين فقط، في حين أن طريقة تحليل الــدنا يمكن إجراءها لأي نموذج صغير جداً من أي مكان في الجسم. حيث أن كل خلية من خلايا الجسم تحتوي على الــدنا.

2 – عند وفاة الشخص يتحلل الجسم وتتحلل أطراف الأصابع بسرعة، في حين أن الــدنا في عظام جسم المتوفى تبقى صالحة للتحليل لسنين طويلة.

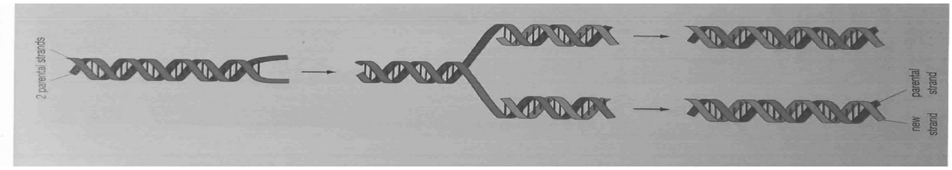
3 – إن طبعات أصابع أي شخص لا علاقة لها بطبعات أصابع الوالدين أو الأبناء، في حين أن تتابعات القواعد في الــدنا للشخص نفسه موجودة في أحد الوالدين أو كلاهما.

في نهاية السبعينات من القرن العشرين تمكن العالم الانكليزي Fred Sanger من اختراع تقنية لاستنساخ التتابع الأصلي لأزواج القواعد في جزيئة الدنا ملايين المرات. فكما هو معروف فإن جزيئة الدنا تكتب بأبجدية تتألف من أربعة حروف A، T، C وG تمثل القواعد الأربع في الجزيئة وهي أدينين، ثايمين، سايتوسين وكوانين. والعملية تحتاج إنزيم وظيفته ببساطة نسخ وربط القواعد، وهذا الانزيم هو بوليميريز (Polymerase) المستخلص من البكتريا، وذلك لتحفيز عملية تخليق جزيئة الدنا من مكوناتها الأساسية وهي القواعد الأربع وسكر الرايبوز ناقص الأوكسجين والفوسفات. وتم تطوير هذه التقنية وتسريع عملية الاستنساخ في نهاية الثمانينات من قبل العالم الأمريكي موليس (Kary Mollis)، وتسمى هذه التقنية PCR (Polymerase Chain Reactions) والتي تعني التفاعل المتسلسل بمساعدة أنزيم البوليميريز. ولا تحتاج هذه الطريقة سوى تتابعات

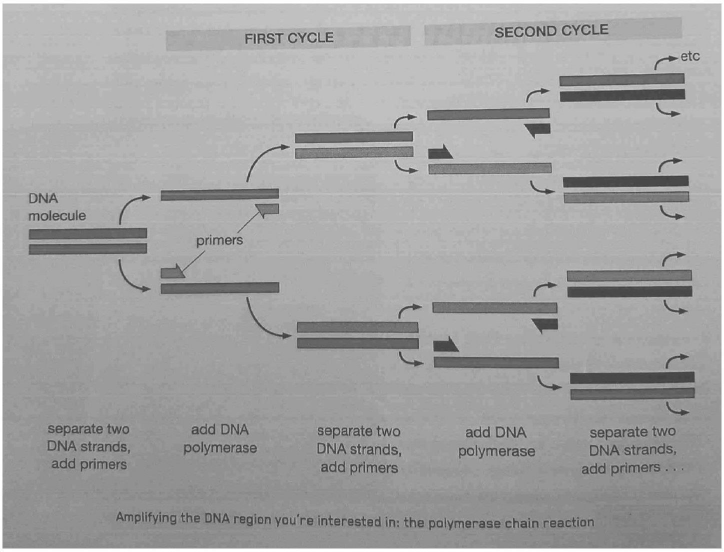
قليلة، أي جزء بسيط من جزيئة الدنا ليتم تكبيرها واستنساخها ملايين المرات خلال فترة قصيرة. ويستخدم تحليل PCR بصورة روتينية في البحث وفي الطب وفي المسائل الجنائية وغيرها من التطبيقات (Watson, 2017). (انظر الشكلين 11 و12).

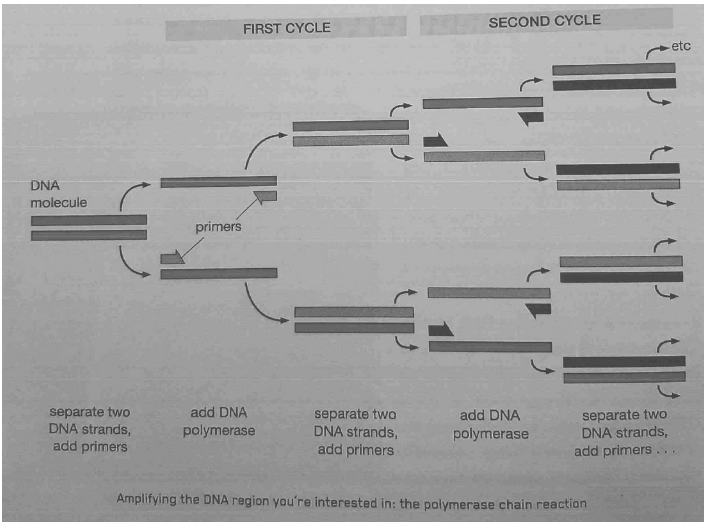
إن تفاعل بوليميريز المتسلسل (PCR) هو في الحقيقة عملية كيميائية بسيطة. فيتم تحضير قطعتين قصيرتين لإحدى جزئي الضفيرة في الدنا، طول كل منها حوالي 20 زوج من القواعد بحيث أن تتابعاتها تتوافق مع تتابعات نموذج الـدنا المطلوب فحصه. وكل من هاتين القطعتين تسمى (Primer). تقوم هاتان القطعتان بالإحاطة بالجين المطلوب فحصه أو دراسته. تضاف هذه الــprimers إلى نموذج الدنا المستخلص من نسيج معين من الجسم. إن هذا النموذج يحتوي فعلياً على الجينوم الكامل، فيتم مضاعفة النموذج لدرجة كبيرة جداً للحصول على كمية من المنطقة المستهدفة لتكون قابلة للتحليل. وعند تسخين الدنا إلى 95 oم ينفصل جزئي الضفيرة بما يسمح لكل primer بالارتباط مع حوالي 20 زوج من القواعد في نموذج الدنا المطلوب فحصه بحيث تتوافق التتابعات في الــprimers مع التتابعات في النموذج. وبذلك نكون قد حصلنا على جزء صغير من لولب مزدوج طوله 20 زوج من القواعد، حيث يبدأ إنزيم دنا بوليميريز بالعمل بإنتاج نسخة مكملة لنموذج الدنا بدءاً من الــprimer، وبذلك يكون قد تم استنساخ المنطقة المستهدفة، أي مضاعفتها. ثم يتم إعادة هذه العملية مرات ومرات وفي كل مرة يتم مضاعفة المنطقة المستهدفة. وبعد 25 دورة من PCR نكون قد حصلنا على حوالي 225 (حوالي 34 مليون ضعف) لنموذج الدنا المستهدف خلال فترة ساعتين فقط. وفي المحصلة فإن المحلول الناتج، والذي بدأ كمزيج من نموذج الدنا مخفف جداً وPrimer وإنزيم دنا بوليميريز ومزيج من القواعد (A ،T ،G ،C) ينتهي كمحلول مركز لمنطقة الدنا المستهدفة.

والمشكلة الرئيسية في تحليل PCR كانت تحطم الإنزيم في درجة 95 oم لذلك كان من الضروري إضافة الانزيم في كل دورة من الدورات الخمسة والعشرين. وقد تم التغلب على هذه المعضلة فيما بعد باستخدام نوع من البكتريا تعيش في الينابيع الحارة (Thermous aquanticus) لإنتاج إنزيم بوليميريز الدنا. ويبين الشكل (12) خطوات عمل طريقة تفاعل البوليميريز المتسلسل (PCR).



الشكل (11) عملية استنساخ الدنا (Watson,2017).



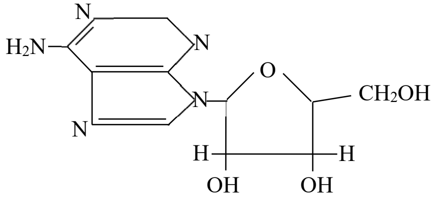


الشكل (12) تفاعل بوليميريز المتسلسل (PCR) (Watson, 2017)

دنا المايتوكوندريا (mtDNA)

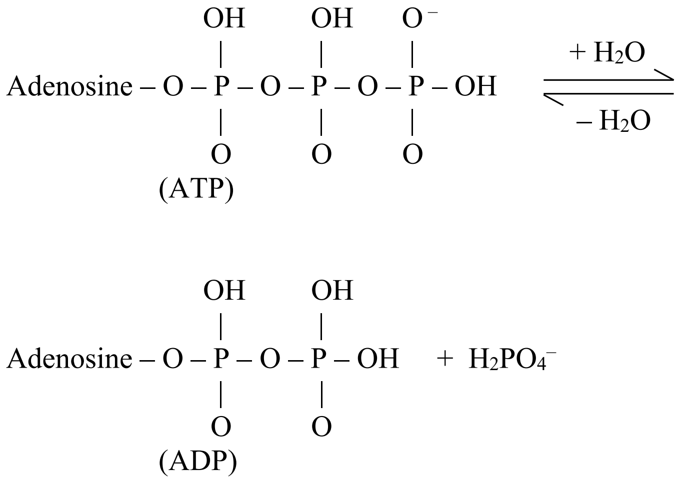
تعرّف المايتوكوندريا بأنها أجسام صغيرة منتشرة داخل سايتوبلازم الخلية خارج النواة. وهذه الأجسام مسؤولة عن توفير الطاقة للخلية الحية. كل واحدة من المايتوكوندريا تحتوي على عدد قليل نسبياً من جزيئات الدنا يبلغ طولها حوالي 16000 زوج من القواعد. وتقدر عدد جسيمات المايتوكوندريا في كل خلية بحوالي 500 – 1000 جسيم. وإن دنا المايتوكوندريا موجودة أصلاً في بيضة الأم، بمعنى أنها تنتقل إلى الأبناء عن طريق الأم فقط، أي إن آلية توفير طاقة الخلية تنتقل إلى الأبناء عن طريق الأم، وهو أمر يدعو للاهتمام حقاً. كما يعتبر دنا المايتوكونديا جزء من الجينوم.

ذكرنا سابقاً بأن المكونات الثلاث للنيوكليوتايد ترتبط مع بعضها بنمط ثلاثي (قاعدة – سكر الرايبوز – فوسفات) وترتبط مجموعة الفوسفات بجزيئة الرايبوز في واحد من موقعين محددين في الجزيئة. وترتبط النيوكليوتيدات مع بعضها لتكوين الجزيئة الطويلة لكل من الدنا، الرنا وكذلك دنا المايتوكوندريا عبر جسور رايبوز (أو رايبوز منقوص الأوكسجين) – فوسفات من خلال آصرة إستر بين حامض الفوسفوريك ومجموعة الهيدروكسيل في سكر الرايبوز. وإذا أُزيحت مجموعة فوسفات من ثلاثية النيوكليوتايد ينتج ما يسمى نيوكليوسايد (اي قاعدة – رايبوز)، انظر الشكل (1). ويطلق على النيوكليوسايد المشتق من أدينين اسم أدينوسين والمشتق من كوانين كوانوسين ومن السايتوسين اسم سايتيدين ومن الثايمين اسم ثايميدين ومن اليوراسيل يوريدين. وعندما يرتبط النيوكليوسايد أدينوسين مع مجموعات الفوسفات يسمى أدينوسين أحادي الفوسفات (AMP) أو ثنائي الفوسفات (ADP) أو ثلاثي الفوسفات (ATP). إن النيوكليوسايد أدينوسين يعتبر ذي أهمية فائقة عند الحديث عن طاقة الخلية. فيما يلي البنية الكيميائية للأدينوسين.



شكل adenosine
(Adenosine)

إن انتقال مجموعات الفوسفات بين ATP وADP تعتبر عملية أساسية فيما يخص طاقة المنظومات البيولوجية عموماً. حيث إن التفاعلات البيولوجية تتضمن تكوين استرات الفوسفات ثم تحللها المائي، وتُحفز هذه التفاعلات بواسطة انزيمات معينة. التفاعل الآتي هو المسؤول عن توفير الطاقة لجميع الخلايا الحية (Cotton and Wilkinson, 1980):

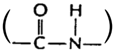


الرنا وتخليق البروتينات

إن المكونات الأساسية لجزيئة الرنا هي نفسها مكونات جزيئة الدنا عدا الثايمين الذي يستبدل باليوراسيل، كما أن بنيتها بشكل لولب منفرد، (الشكل 5).

تؤكد الفكرة التي اقترحها فرانسز كريك والتي أسماها "بالعقيدة المركزية" (Central dogma)، والتي تبناها الباحثون من بعده، بأن تخليق البروتينات يجب أن يبدأ بالـدنا مروراً بالـرنا وانتهاءً بالبروتين، ولا يمكن حصول العكس أبداً، بمعنى أن البروتين لا يمكن أن يتولى تخليق الدنا أو الرنا:

Protein ⇄ RNA ⟶ DNA

وإن الرنا فقط يمكن أن يتحول إلى الدنا بفعل إنزيم خاص. فعندما تتولى الخلية الحية تخليق البروتين، ترتبط مجموعة كاربوكسيل من جزيئة حامض أميني بمجموعة أمين من جزيئة ثانية لتكوين آصرة ببتايد ().

ثم ترتبط مجموعة الكاربوكسيل للجزيئة الثانية بمجموعة أمين لجزيئة ثالثة... وهكذا ولحين تكوين جزيئة طويلة من البروتين تسمى سلسلة بولي ببتايد.

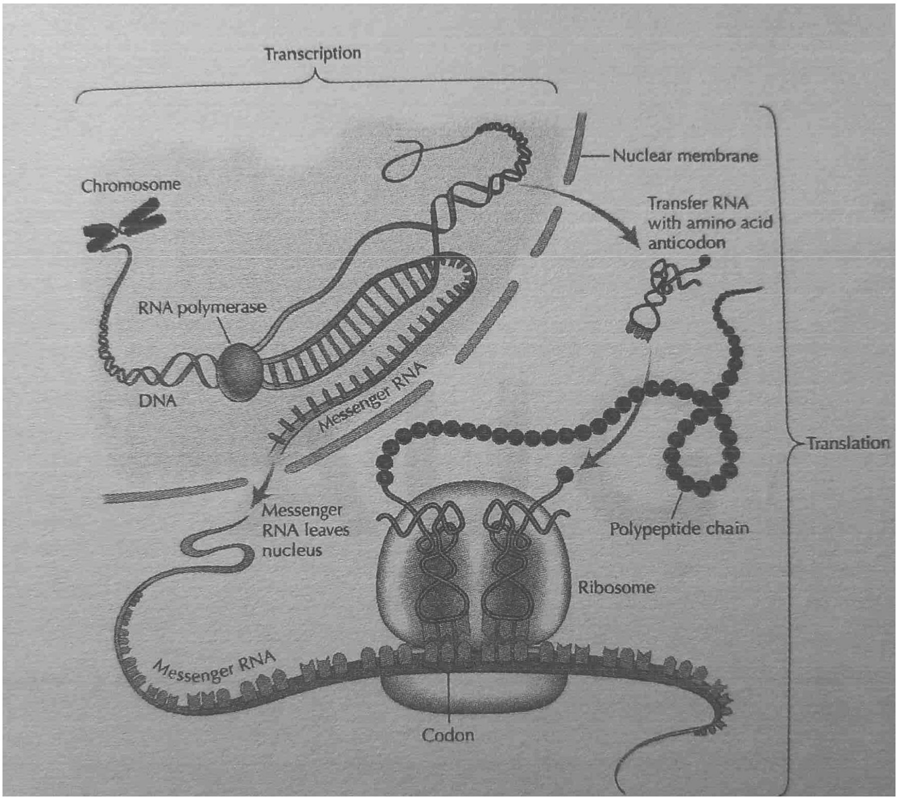
```
                O           H        O              H       O
    |           ||          |        ||             |       ||
– N – CH2 – C – OH + H – N – CH2 – C – OH + H – N – CH2 – C –
OH ... →

                O  H          O  H               O
    |           ||  |         ||  |              ||
– N – CH2 – C – N – CH2 – C – N – CH2 – C – OH .......
```

(بوليمر) سلسلة بولي ببتايد

يبين الشكل (13) مخطط لكيفية عمل الشفرة الجينية خلال عملية تخليق البروتين (Cobb, 2016). حيث تنفتح الضفيرة جزئياً في اللولب المزدوج لجزيئة DNA ويستنسخ أحد جزئي الضفيرة إلى ما يسمى الرنا المراسل (mRNA)، والذي يحتوي على تتابعات (sequences) غير معنية بتصنيع البروتينات تسمى الانترونات (introns) والتي تنقسم بدورها لتكوين mRNA ناضج، والذي يغادر نواة الخلية. وفي سايتوبلازم الخلية تقوم الرايبوسومات التي أساسها الرنا "بقراءة" الرسالة الجينية. كما أن جزيئات الرنا الناقل (tRNA)، والتي يتم إنتاجها بواسطة الخلية من الدنا الموجود في نواتها، تحمل في أحد جوانبها ما يسمى بالانتي كودون (anticodon) والذي يرتبط مع كودون (codon) معين من نوع mRNA، وفي جانبها الآخر تحمل موقع التحام يقوم بالارتباط مع حامض أميني معين. وخلال العملية التي تعرف "بالترجمة" (translation)، تقوم جزيئات tRNA المرتبطة بحامض أميني معين بالانتقال بصورة مكوكية خلال الريبوسوم (ribosome)، وترتبط مع كودون mRNA وتطلق حامضها الاميني، وبذلك تنتج السلسلة البروتينية.

وهناك 64 ثلاثية قواعد (كودونات) تقوم بعمل التشفير لحوامض أمينية معينة خلال عملية إنتاج البروتينات كما مبين في الجدول رقم (3). ويكون عدد الكودونات إما واحد أو اثنان أو ثلاثة أو أربعة أو ستة، وحسب نوع الحامض الأميني المطلوب لعملية إنتاج البروتين منه داخل سيتوبلازم الخلية الحية. حيث تتولى جزيئة tRNA التي تمتلك

التعليمات (الشفرة) الموجودة في mRNA بتحويلها إلى "أوامر" لترتيب الحوامض الأمينية بنمط تتابعي (sequence) خاص بالبروتين المراد إنتاجه وفق الشفرة الخاصة بإنتاج هذا البروتين، والموجودة ضمن الشفرة التي يحملها mRNA. ثم يرتبط الحامض الأميني بموقع خاص ضمن tRNA بتحفيز من قبل إنزيم متخصص. وبعد ذلك يرتبط كودون في جزيئة tRNA بنظيره في جزيئة mRNA المرتبطة بالرايبوسوم. وعند ذلك تتكون آصرة ببتايد بين الحامض الاميني الموجود في جزيئة mRNA وسلسلة البولي ببتايد النامية لتكوين البروتين. وحيث أن عدد الحوامض الامينية اللازمة لإنتاج البروتينات يبلغ 20 حامض أميني، فذلك يقتضي وجود 20 نوع من tRNA و20 نوع من الإنزيم المتخصص (Cobb, 2016).



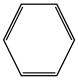
الشكل (13) عملية إنتاج البروتين (Cobb, 2016).

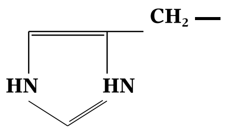
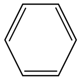
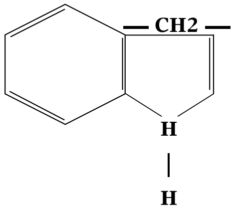
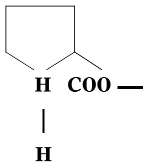
إن اكتشاف الدور المركزي لجزيئة الرنا في الخلية الحية قد أثار سؤالاً مهماً وهو لماذا تحتاج المعلومات التي يحملها الدنا للذهاب من خلال الرنا كمرحلة وسطية قبل امكانية "ترجمتها" إلى بروتين. فقد اقترح فرانسز كريك (Francis Crick) بعد فترة قصيرة من اكتشافه بنية الدنا، ومن ثم الشفرة الجينية، اقترح حلاً لهذا التناقض بأن اعتبر الرنا كسابق للـدنا زمنياً. فقد تخيل الحياة بدأت بما سماه "عالم الرنا" الذي سبق "عالم الدنا" المألوف لدينا الآن. فاستنتج بأن كيمياء الرنا المختلفة (من حيث امتلاكها جزيئة سكر الرايبوز في تركيبها وليس الرايبوز منقوص الاوكسجين الموجود في الدنا)، قد منحت الرنا خواصاً إنزيمية تسمح له بالعمل كعامل مساعد لاستنساخ نفسه. واعتمد كريك لإثبات رأيه هذا، على الفكرة التي تعتبر الدنا يجب أن يكون متطور لاحقاً، ربما كاستجابة لكون استقراريه جزيئات الرنا قليلة نسبياً، حيث إنها تتلف وتتحور بسهولة أكبر بكثير من جزيئات الدنا.

وبعد سـنوات لاقـت أفكار فرانسـز كريك هـذه دعماً قويـاً نتيجة أبحـاث قام بها تـوم جيـك (Tom Ceck) مـن جامعة كـولارادو وسـيدني أولتمـان (Sidney Altman) مـن جامعـة ييـل (Yale)، كلاً علـى انفـراد بـأن جزيئـات الرنـا تمتلـك فعـلاً خواصاً تحفيزيـة. وقـد حصـل جيـك وأولتمـان علـى جائـزة نوبل فـي الكيميـاء لعـام 1989. وأكثـر مـن ذلك، فقد أثبـت هـاري نولـر (Harry Noller) مـن جامعـة كاليفورنيا بأن أواصـر الببتايـد التي تربـط الحوامـض الأمينية مـع بعضها لإنتـاج البروتينـات تتكون عملياً بفعل عمل الرنا كعامل مساعد (Watson, 2017).

ومن بين مئات الحوامض الأمينية المعروفة، هناك 20 حامض أميني فقط يحتاجها الإنسان في حياته ويمكنه الحصول عليها عن طريق الغذاء النباتي والحيواني. والجدول رقم (2) يضم أسماء هذه الحوامض الأمينية.

الجدول (2) الحوامض الأمينية التي يحتاجها الإنسان (د. نعمان النعيمي، 2001).

الرقم	اسم الحامض	الاسم بالانكليزية	مجموعة R
1	غلايسين	Glycine	H
2	ألانين	Alanine	CH_3
3	فالين	Valine	$(CH_3)_2CH$
4	ليوسين	Leucine	$(CH_3)_2CHCH_2$
5	آيزوليوسين	Isoleucine	CH_2 \ CH_2 \ CH / CH_2
6	سيرين	Serine	CH_2 — | OH
7	ثريونين	Threonine	CH_2 — CH — | OH
8	تايروسين	Tyrosine	HO —  — CH —
9	سيستين	Cysteine	CH_2 — | SH
10	ميثايونين	Methionine	CH_2 — CH_2 — | S — CH_2
11	حامض أسبارتيك	Aspartic acid	OOC — CH_2 —
12	أسباراجين	Asparagine	H2N — C — CH_2 — ‖ O

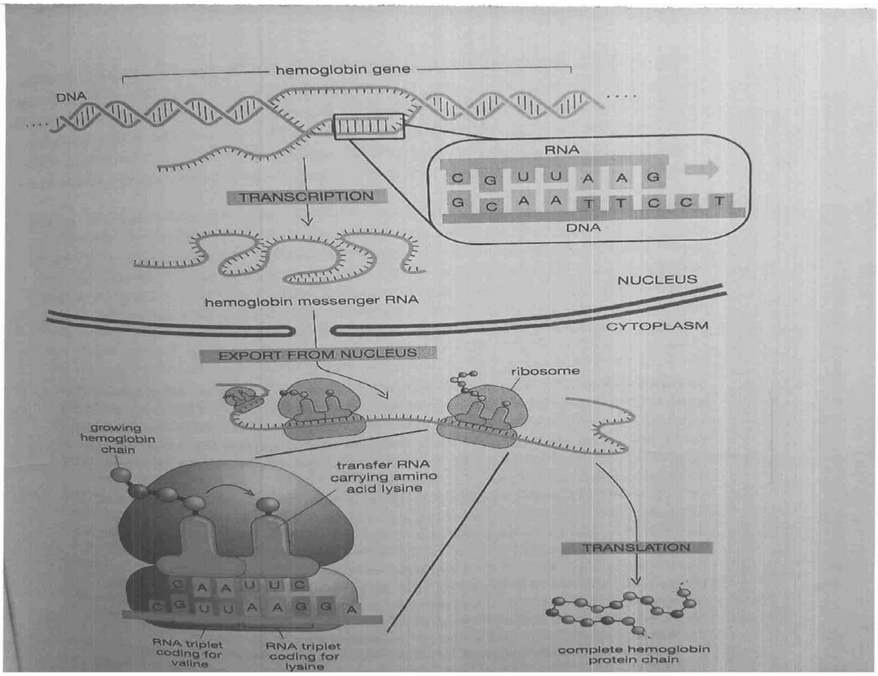
الرقم	اسم الحامض	الاسم بالانكليزية	مجموعة R
13	حامض غلوتاميك	Glutamic acid	— OOC — CH — CH_2 —
14	غلوتامين	Glutamine	H_2N — C — CH_2 — CH_2 — ‖ O
15	آرجنين	Arginine	H — N — CH — CH_2 — CH_2 — | C = NH | NH_2
16	لايسين	Lycine	CH_2 — CH_2 — CH_2 — CH_2 — | NH_2
17	هستدين	Histidine	
18	فنيل ألانين	Phenyl alanine	 — CH_2 —
19	تربتوفان	Tryptophan	
20	برولين	Proline	

ويبين الشكل (14) نفس عملية تخليق البروتين بمراحلها الموضحة أعلاه، ولكن هذه المرة لتخليق بروتين محدد وهو الهيموجلوبين.

تتخصص خلايا الدم الحمراء كناقلات للأوكسجين فتستخدم الهيموجلوبين لنقل الأوكسجين من الرئتين إلى الأنسجة التي تحتاج إليه. تنتج خلايا الدم الحمراء في نخاع العظم بواسطة الخلايا الجذعية، بمعدل حوالي 2.5 مليون خلية في الثانية.

وعندما تنشأ الحاجة لإنتاج الهيموجلوبين، ينفتح المقطع المحدد لجزئي الضفيرة في دنا نخاع العظم (الجين المسؤول عن تخليق الهيموجلوبين)، بنفس الطريقة التي ينفتح فيها عند عملية الاستنساخ، وفي هذه المرة يتم استنساخ جزء واحد من الضفيرة، وبدلاً من إنتاج ضفيرة أو لولب واحد جديد من الدنا، ينتج لولب واحد جديد يسمى الرنا المراسل (mRNA) وذلك بمساعدة إنزيم يسمى بوليميريز الرنا (RNA Polymerase)، بما يتوافق مع جين الهيموجلوبين. بعد ذلك يعود الدنا هذا لوضعه الاعتيادي كلولب مزدوج.

ينتقل mRNA إلى خارج النواة ويندمج مع الرايبوسوم الذي هو نفسه يتكون من الرنا وبروتينات، حيث تستخدم المعلومات الموجودة على التتابعات في mRNA لإنتاج جزيئة بروتين جديدة. وتسمى هذه العملية "بالترجمة". ويتم جلب الحوامض الأمينية ملتصقةً بالــtRNA إلى موقع الرايبوسوم. وفي حالة الهيموجلوبين فإن الحوامض الأمينية هي لايسين (lysine) وفالين (Valine). وفي إحدى نهايات tRNA توجد ثلاثية معينة من القواعد (CAA) والتي تتوافق مع ثلاثية القواعد المقابلة في mRNA (GUU). وفي النهاية الأخرى، يحمل tRNA الحامض الأميني المناسب وفي هذه الحالة هو الفالين. ويتكون لايسين tRNA على الثلاثية التالية في mRNA نظراً لكون تتابع القواعد في الدنا هو TTC (المختص بالحامض الأميني لايسين)، وكل ما يتبقى إذاً هي عملية لصق أو دمج هذين الحامضين الأمينيين على نحو بايوكيميائي. وتتكرر هذه العملية لعدد من المرات بقدر طول سلسلة الهيموجلوبين المطلوبة. فتتكون أربع سلاسل ملتفة حول بعضها بشكل معقد، وعندما تكتمل جزيئة الهيموجلوبين بالشكل المطلوب تدخل ذرة حديد في وسطها وتبدأ بالعمل في نقل الأوكسجين، (انظر الشكل 14) والجدول (3).



الشكل (14) عملية إنتاج سلسلة بروتين الهيموكلوبين (Watson,2017).

الجدول (3) ثلاثيات القواعد* (الكودونات) التي تقوم بوظيفة الشفرة المحدِّدة للحوامض الأمينية في عملية إنتاج البروتينات (Watson, 2017).

The Genetic Code						
Amino Acid	RNA Codon					
Alanine	GCA	GCC	GCG	GCU		
Arginine	AGA	AGG	CGA	CGC	CGG	CGU
Asparagines	AAC	AAU				
Aspartic acid	GAC	GAU				
Cysteine	UGC	UGU				
Gultamic acid	GAA	GAG				
Glutamine	CAA	CAG				
Glycine	GGA	GGC	GGG	GGU		
Histidine	CAC	CAU				
Isoleucine	AUA	AUC	AUU			

The Genetic Code						
Amino Acid	**RNA Codon**					
Leucine	UUA	UUG	CUA	CUC	CUG	CUU
Lysine	AAA	AAG				
Mehionine	AUG					
Phenylalanine	UUC	UUU				
Proline	CCA	CCC	CCG	CCU		
Serine	AGC	AGU	UCA	UCC	UCG	UCU
Therionine	ACA	ACC	ACG	ACU		
Tryptophan	UGG					
Tyrosin	UAC	UAU				
Valine	GUA	GUC	GUG	GUU		
Stop Codons	UAA	UAG	UGA			

(*) القواعد هي في الحقيقة نوكليوتيدات (قاعدة - سكر - فوسفات).

References

- Blackburn, E. and Epel, E. (2017) The Telomere Effect. Grand Central Publishing, N.Y, Boston.
- Cotton, F. A. and Wilkinson, A. (1980) Advanced Inorganic Chemistry. A comprehensive Text, John Wiley and Son.
- Cobb, M.(2016) Life's Greatest Secret, The Race to Crack the Genetic code. Profile Books.
- Encyclopedia Britannica, Inc. (2015)
- McHugen, A. (2020) DNA Demystified, Unraveling the Double Helix. Oxford University Press.
- ذرى العلم في القرن العشرين – د. نعمان النعيمي – وزارة الثقافة – دار الشؤون الثقافية العامة (2001).
- Olby, R. (1994) The Path to the Double Helix, The Discovery of DNA. Dover Publications, Inc., New York.
- D. Reich,(2018) Who We Are and How We Got Here. Vintage Books.
- What is life, (1944) E. Schrödinger, Cambridge University Press.
- Rutherford, A. (2017) A Brief History of Everyone Who Ever Lived, Published in North America by the Experimental, LLC.
- Watson, J. and Crick, F.(1953) Molecular Structure of Nucleic Acids. A structure for Deoxyribose Nucleic Acid. Nature, April 25 (1953).
- Watson, J. (2017) DNA: The Story of the Genetic Revolution. Editor: Alfred A. Knopf, New York.