



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة الشهيد حمه لخضر – الوادي

University of Echahid Hamma Lakhdar – El-Oued



كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم البيولوجيا

لنيل شهادة الماستر L.M.D.

شعبة العلوم البيولوجية

تخصص: التنوع الحيوي وفيزيولوجيا النبات

الموضوع:

مساهمة في دراسة الخواص الفيزيائية والبيوكيميائية خلال مراحل النضج عند ثمار الطماطم

(*Solanum lycopersicum. L*)

من إعداد:

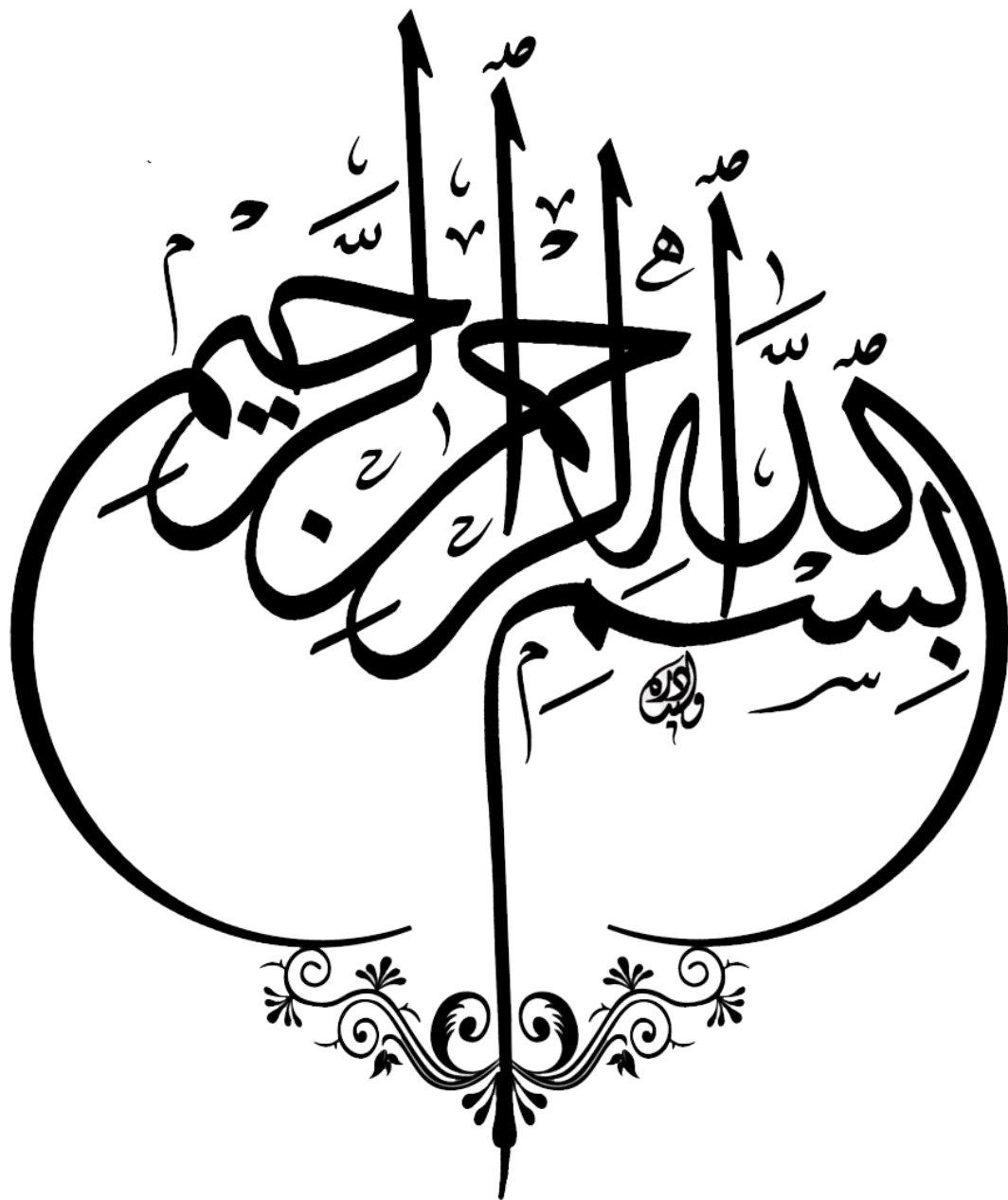
مسعي أحمد كوثر

مناعي مروة

نوقشت يوم 11/06/2026 من طرف لجنة المناقشة:

د. مسلوب أحلام	أستاذ محاضر (ب)	رئيسا	جامعة الوادي
د. بن الحبيب عبد الحميد	أستاذ مساعد (أ)	مؤطرا	جامعة الوادي
د. شنة عدالة	أستاذ محاضر (ب)	مناقشا	جامعة الوادي

الموسم الجامعي: 2026/2025



شُكْرِي وَتَقْدِيرِي

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله رب العالمين، نحمده سبحانه وتعالى على نعمه التي لا تُعد ولا تُحصى، ونشكره على توفيقه وعونه في إتمام هذا العمل، ونسأله أن يجعله خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به كل من يطلع عليه. كما نتوجه بالدعاء إلى الله عز وجل أن يوفقنا إلى المزيد من العلم النافع والعمل الصالح، وأن يرزقنا الإخلاص والسداد في القول والعمل.

بكل مشاعر الامتنان والتقدير، أقدم بخالص الشكر والعرفان إلى

الأستاذ بن الحبيب عبد الحميد

الذي كان خير موجه ومرشد طوال مراحل إنجازه هذا العمل. فقد أغدق علينا من علمه وخبرته ووقته دون تردد، وكان لتوجيهاته السديدة وملاحظاته القيمة الأثر البالغ في تجاوز الصعوبات وتحسين جودة هذا البحث.

لقد تعلمنا منه أن البحث العلمي ليس مجرد نتائج ومعطيات، بل هو صبر واجتهاد وأمانة علمية. فكان حضوره الدائم، وتشجيعه المستمر، وحرصه على أدق التفاصيل مصدر دعم وثقة دفعنا إلى المضي قدماً بعزيمة وإصرار.

كما نتقدم إليه بخالص الدعوات بأن يحفظه الله تعالى ويديم عليه نعمة الصحة والعافية، وأن يوفقه في مسيرته العلمية والمهنية، وأن يبارك له في جهوده وعطاءه، وأن يجعل كل ما يقدمه لطلابه وللعلم في ميزان حسناته يوم القيامة

وأن يرفع قدره في الدنيا والآخرة، وأن يرزقه السعادة والتوفيق في جميع أموره. فله منا كل الاحترام والتقدير والعرفان، سائلين

المولى عز وجل أن يديم عليه فضله وكرمه، وأن يحجزه به خير ما يُجزى به المعلم عن طلابه والمرشد عن تلامذته

الإهداء

﴿وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ﴾

التوبة: 105

لم تكن الرحلة قصيرة، ولا ينبغي لها أن تكون، فالحمد لله الذي يسر البدايات، وبلغنا النهايات بفضلته وكرمه. أهدى تخرجي ونجاحي إلى نفسي الطموحة أولاً، ثم إلى كل من سعى معي لإتمام مسيرتي الدراسية، وساندني في كل خطوة، فكان لي خير عون وسند.

إلى من قال الله تعالى فيهما:

﴿وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيْنِي صَغِيرًا﴾

إلى من كَلَّمَهُ الله بالهبة والوقار، إلى الذي نَزَّيْنِ اسمي بأجمل الألقاب، ودعمني بلا حدود، وأعطاني بلامقابل، إلى من عَلَّمَنِي أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة، وإلى من غرس في روحي مكارم الأخلاق، وكان داعمي الأول وسندي وقوتي بعد الله.

(والدي العزيز)

إلى الروح التي رحلت وبقي أثرها حيًا في كل تفاصيل حياتي، إلى من عَلَّمَتَنِي القوة دون أن تتحدث عنها، وتمررت في الأمل ثم غابت، وبقي دعاؤها يرافقني في كل خطوة.

ما كان لهذا الإنجاز أن يرى النور لولاك، فأنت البداية، وأنت الدعاء، وأنت السند وإن غاب الجسد.

(والدتي مرحمها الله)

إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي، إلى من شددت عضدي بهم، فكانوا لي خير سند وعون.

(إخوتي وأخواتي)

إلى زميلتي في هذا العمل كثر، شريكة النجاح والكفاح، شكرًا لك على تعاونك وجهودك القيمة التي أسهمت في إنجاز هذا

العمل، وأسأل الله لك دوام التوفيق والنجاح

إلى صديقاتي، رفيقات الدرب وصاحبات الذكريات الجميلة، شكرًا لكن على المودة الصادقة والدعم الذي كان له بالغ الأثر في هذه المسيرة.

- وفي الختام، الحمد لله الذي لا يُثمَّ أمرٌ إلا بفضلته، ولا يُنجز نجاحٌ إلا بتوقيفه.

هـ مروة

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

بفضلك لا يجهدني، وبعطائك لا بجولي وقوتي، الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

الحمد لله أولاً وآخراً، وظاهراً وباطناً، الذي أنار لي الطريق ويسّر لي السبل، ومنّ عليّ بإتمام هذا العمل. فكل ما وصلت إليه هو بفضلُه

وتوفيقه ورحمته، لا يجهدني وحدي، ولا بقدرتي، وإنما بكرمه الذي لا يتفد.

اهدي ثمرة نجاحي لنفسي التي آمنت بي، لنفسي التي صبرت حين كان الطريق طويلاً.

إلى والدي العزيزين

إلى معلمي الأول، إلى من أحمل صفاته وأطباعه، إلى الذي منحني الثقة لأكمل الطريق، إلى سندي بعد الله، أبي. أهدي إليك هذا الحصاد،

فما أنا إلا أثرٌ من كفاحك، وقصة نجاح انت بطلها.

إلى من لولا مرضاها لما اهتديت سبيلاً، ولولا كفاحها لما بلغت مقاماً. إلى دستور الحب وقبلة الحنان، إلى التي كانت صلواتها تسبق

خطاي، ودعواتها تفتح لي مغاليق الأبواب. إلى التي أحمل ملاحمها أمي. أهدي إليك هذا الجهد المتواضع، اعترافاً بأنني ما كنت لأكون،

لولا أنك كنت بجانبني.

إلى المؤسسات الغاليات، مشاركات الملامح والصفات، إلى سكينه القلب وضحكة بعد تعب، "إخواتي" أهدي اليكن ثمرة جهدي

الذي كنتن جزء منه.

إلى أولئك الذين رسموا أحلامهم على جدران الجامعات، وجعلوا دفاترهم طريقاً إلى الشهادة.

إلى طلبة غرة الصامدين الذين مرحلوا قبل أن تكتمل الحكاية، وقبل أن تُنادى أسماءهم يوم التخرج.

نهديكم هذا الإنجاز عرفاناً بصمودكم، ونحملكم في الدعاء والذاكرة ما حيناً.

إلى عائلتي الكريمة...

إلى من أحاطني بالمودعة والتشجيع والدعاء، وكان لهم أثر في مسيرتي العلمية والإنسانية، أهديكم هذا العمل تقديرًا ووفاءً.

إلى مشاركات الأهداف والغايات والمخطى والرحلة، والنجاحات والاختافات والمودة والأخوة اليكن صديقاتي.

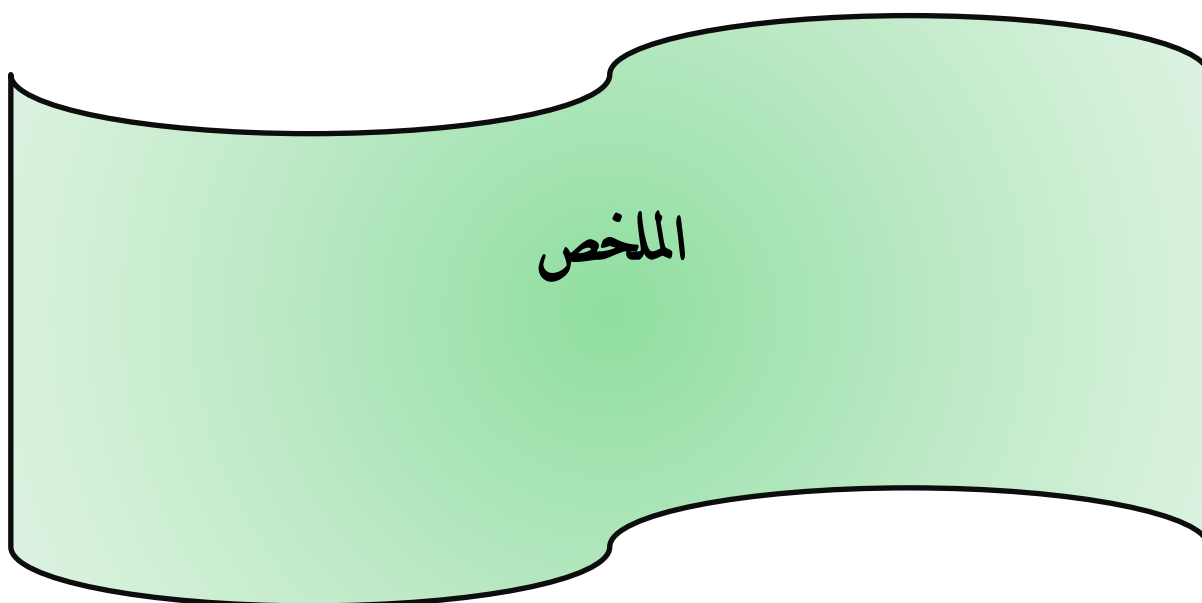
إلى صديقات الرحلة، اللاتي كنتن حاضرات في كل خطوة، شريكات في الجهد، وسنداً في التحديات، ومرافقاً في النجاح

"مرئاج، مروة، هالة" . . . شكرًا لأنكم كنتم جزءًا جميلًا من هذه الحكاية.

الى كل من ساهم من قريب او بعيد في وصولي لهذه المرحلة...

اهدي هذا العمل مراجعة ان يكون ثمرة علم نافع.

هكوثر



الملخص

أجريت هذه الدراسة على ثمار الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.) صنف امتياز في ثلاث مراحل نضج مختلفة: مرحلة النضج الأخضر (MG) ، ومرحلة التلون (TS) ، ومرحلة النضج الأحمر (RS) ، بهدف تقييم التغيرات الحاصلة في بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية المصاحبة لعملية النضج. أظهرت النتائج وجود فروق معنوية في معظم الخصائص المدروسة تبعا لمرحلة النضج، حيث سجلت الثمار في مرحلة النضج الأخضر (MG) أعلى محتوى من الكربوهيدرات الكلية وأعلى صلابة، في حين كانت الأدنى في محتوى الليكوبين والبيتا-كاروتين وفيتامين أ وقيمة الرقم الهيدروجيني (pH) أي أعلى حموضة. أما مرحلة التلون (TS) فقد تميزت بأعلى محتوى من الفينولات الكلية، كما سجلت قيمة متوسطة للحموضة. بينما سجلت ثمار مرحلة النضج الأحمر (RS) أعلى محتوى من الليكوبين والبيتا-كاروتين وفيتامين أ وقيمة pH أي أقل حموضة، وسجلت أدنى قيمة للصلابة. في المقابل، لم تظهر المادة الجافة والرطوبة فروقا معنوية بين مراحل النضج المختلفة.

وبينت النتائج أن مرحلة النضج الأحمر (RS) تمثل المرحلة الأكثر تقدما من حيث القيمة الغذائية المرتبطة بمضادات الأكسدة، بينما تمثل مرحلة التلون (TS) المرحلة المتلى من حيث محتوى الفينولات الكلية، في حين تتميز مرحلة النضج الأخضر (MG) بارتفاع محتوى الكربوهيدرات والصلابة. وتعكس هذه التغيرات التحولات الأيضية المصاحبة لعملية النضج، والمتمثلة في تراكم الكاروتينات، واستهلاك الكربوهيدرات، وتفكك مكونات الجدار الخلوي، إضافة إلى انخفاض درجة الحموضة نتيجة استهلاك الأحماض العضوية مع تقدم النضج.

الكلمات المفتاحية: الطماطم، النضج، الليكوبين، البيت-كاروتين، الفينولات، الكربوهيدرات، الصلابة.

الملخص باللغة الإنجليزية (Abstract)

This study was conducted on tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Imtiaz at three distinct ripening stages: Mature Green (MG), Turning Stage (TS), and Red Stage (RS), with the aim of evaluating the physicochemical changes associated with the ripening process.

The results revealed significant differences in most of the studied parameters according to the ripening stage. Fruits at the Mature Green stage (MG) recorded the highest total carbohydrate content and firmness, while exhibiting the lowest levels of lycopene, beta-carotene, vitamin A, and pH (i.e., highest acidity). The Turning Stage (TS) was characterized by the highest total phenolic content and intermediate acidity. Red Stage (RS) fruits recorded the highest concentrations of lycopene, beta-carotene, and vitamin A, along with the highest pH values (i.e., lowest acidity), and the lowest firmness. In contrast, dry matter and moisture content showed no significant differences among the three ripening stages.

The results indicate that the Red Stage (RS) represents the most advanced stage in terms of antioxidant-related nutritional value, while the Turning Stage (TS) constitutes the optimal stage with regard to total phenolic content. The Mature Green stage (MG) is distinguished by elevated carbohydrate content and firmness. These changes reflect the metabolic transformations accompanying the ripening process, including carotenoid accumulation, carbohydrate consumption, cell wall component degradation, and a reduction in acidity attributable to the progressive utilization of organic acids during ripening.

Keywords: Tomato, ripening, lycopene, β -carotene, phenolic, carbohydrates, firmness.

الفهرس

فهرس المحتويات

I	شكر وتقدير
II	الاهداء
III	الاهداء
VI	الملخص
VII	الملخص باللغة الإنجليزية (Abstract)
VIII	الفهرس
X	فهرس المحتويات
XV	قائمة الجداول
XVII	قائمة الوثائق
XX	قائمة الاختصارات
1	مقدمة

الجزء النظري

الفصل الأول: دراسة نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum. L*)

5	1. تعريف الطماطم:
5	2. تاريخ وموطن الطماطم:
6	3. التصنيف النباتي للطماطم:
7	4. الوصف المورفولوجي لنبات الطماطم:
7	1.4 الجذر:
8	2.4 الساق:
8	3.4 الأوراق:
9	4.4 النورات:
10	5.4 الأزهار:
10	6.4 الثمار:
11	7.4 البذور:
12	5. دورة حياة نبات الطماطم:
12	1.5 مرحلة الإنبات:
12	2.5 مرحلة النمو الخضري:
12	3.5 مرحلة الإزهار:
12	4.5 مرحلة التلقيح والإخصاب:

12.....	5.5 مرحلة الإثمار:
13.....	6. مراحل تكوين ونمو ثمار نبات الطماطم:
14.....	1.6 مرحلة تشكل الثمار:
14.....	1.1.6 الإزهار:
15.....	2.1.6 الإخصاب:
15.....	3.1.6 عقد الثمار:
15.....	2.6 مرحلة نمو الثمرة:
15.....	1.2.6 النمو الخضري للثمار:
16.....	2.2.6 طور النضج الأخضر:
16.....	3.6 نضج الثمار:
16.....	1.3.6 طور ابتداء التلوين:
17.....	2.3.6 طور تلون ثلاثة أرباع الثمرة:
17.....	3.3.6 طور تمام النضج:
18.....	7. الأمراض والآفات:
18.....	1.7 الأمراض:
20.....	2.7 الآفات:
21.....	8. إنتاج نبات الطماطم:
21.....	1.8 في العالم:
21.....	2.8 في الجزائر وولاية الوادي:
22.....	9. أهمية نبات الطماطم:

الفصل الثاني: بيو كيمياء الطماطم

24.....	1. القيمة الغذائية لنبات الطماطم:
25.....	2. التركيب الكيميائي لنبات الطماطم:
27.....	3. بعض المركبات النشطة بيولوجيا في الطماطم:
27.....	1.3 الليكوبين Lycopene:
27.....	1.1.3 تعريف الليكوبين:
28.....	2.1.3 البنية الكيميائية لليكوبين:
28.....	3.1.3 الخصائص الفيزيوكيميائية لليكوبين:
29.....	4.1.3 مصادر الليكوبين:
29.....	5.1.3 التخليق الحيوي لليكوبين:

30	5.1.3 فوائد الليكوبين:
30	1.5.1.3 عند الإنسان:
31	2.5.1.3 عند الطماطم:
32	2.3 مركب البيتا-كاروتين:
32	1.2.3 تعريف بيتا-كاروتين:
32	2.2.3 البنية الكيميائية لبيتا-كاروتين:
33	3.2.3 الخصائص الفيزيوكيميائية:
33	4.2.3 المصادر الغذائية لبيتا-كاروتين:
34	5.2.3 التخليق الحيوي لبيتا-كاروتين:
35	6.2.3 فوائد البيتا-كاروتين:
35	1.6.2.3 فوائده للإنسان:
36	2.6.2.3 بالنسبة للنبات:
37	3.6.2.3 بالنسبة لثمار الطماطم:
37	3.3 المركبات الفينولية (Phenolic Compounds):
37	1.3.3 تعريف المركبات الفينولية:
38	2.3.3 البنية الكيميائية للمركبات الفينولية:
38	3.3.3 الخصائص الفيزيوكيميائية للمركبات الفينولية:
40	4.3.3 مصادر المركبات الفينولية:
41	5.3.3 تخليق المركبات الفينولية:
42	6.3.3 فوائد المركبات الفينولية:
42	1.6.3.3 للإنسان:
42	2.6.3.3 للنبات:
43	3.6.3.3 لنبات الطماطم:
44	4.3 الكربوهيدرات:
44	1.4.3 تعريف الكربوهيدرات:
44	2.4.3 البنية الكيميائية للكربوهيدرات:
44	3.4.3 مصادر الكربوهيدرات:
45	4.4.3 تخليق الكربوهيدرات:
45	1.4.4.3 التمثيل الضوئي ودورة كالفن:
45	2.4.4.3 تخليق السكروز والنشاء:

45.....	3.4.4.3 تخليق السيليلوز:
45.....	5.4.3 فوائد الكربوهيدرات:
45.....	1.5.4.3 فوائدها للإنسان:
46.....	2.5.4.3 فوائدها للنبات:
46.....	3.5.4.3 فوائدها للطماطم:

الجزء التطبيقي

الفصل الأول: المواد والطرق

50.....	1. منطقة الدراسة:
50.....	1.1 منطقة الدراسة والموقع الجغرافي:
51.....	2.1 الظروف المناخية العامة لولاية الوادي:
51.....	3.1 موقع التجربة:
52.....	4.1 المادة النباتية:
52.....	5.1 تصميم التجربة:
53.....	6.1 مراحل النضج المدروسة:
53.....	7.1 جمع العينات وتحضيرها:
54.....	2. الخطوات التجريبية:
54.....	1.2 تقدير نسبة الرطوبة والمادة الجافة:
54.....	2.2 تقدير الصلابة:
55.....	3.2 تقدير درجة pH:
55.....	4.2 استخلاص وتقدير الكربوهيدرات:
56.....	5.2 استخلاص وتقدير الفينولات الكلية:
58.....	6.2 استخلاص وتقدير الكاروتنويدات:
58.....	1.2.6 استخلاص وتقدير البيتا-كاروتان:
58.....	2.2.6 تقدير الليكوبين:
59.....	7.2 تقدير محتوى الفيتامين أ:

الفصل الثاني: النتائج والمناقشة

61.....	1. محتوى الرطوبة والمادة الجافة:
62.....	2. قوة الصلابة:
63.....	3. درجة الحموضة (pH):
64.....	4. محتوى الكربوهيدرات:

66.....	5. محتوى الفيديوات:
67.....	6. محتوى الليكوبين:
68.....	7. محتوى البيتا-كاروتين:
69.....	8. محتوى الفيتامين أ:
72.....	خلاصة عامة
74.....	قائمة المراجع
90.....	الملاحق

قائمة الجداول

قائمة الجداول

- الجدول (01): التصنيف العلمي لنبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L).....7
- الجدول(02): الأمراض والاضطرابات الفسيولوجية لنبات الطماطم.....18
- الجدول(03): آفات نبات الطماطم.....20
- الجدول (04): تطور انتاج الطماطم في ولاية الوادي.....21
- جدول (05) : القيمة الغذائية للطماطم في 100 غ من الطماطم الخام.....24
- الجدول (06): الخصائص الفيزيوكيميائية لليكوبين.....28
- الجدول (07): محتوى الليكوبين في بعض الفواكه الطازجة.....29
- الجدول (08): الخصائص الفيزيائية والكيميائية لبيتا-كاروتين.....33
- الجدول (09): محتوى بعض المصادر الغذائية من بيتا-كاروتين.....33
- الجدول (10): الخصائص الفيزيوكيميائية لبعض المركبات الفينولية.....38
- الجدول (11): مراحل النضج المدروسة.....53
- الجدول (12):محتوى الرطوبة والمادة الجافة في ثمار الطماطم خلال مراحل النضج المختلفة.....61

قائمة الوثائق

قائمة الوثائق

- 6..... الوثيقة (01): المواطن الأولى للطماطم وانتشارها.
- 7..... الوثيقة (02): المجموع الجذري للطماطم.
- 8..... الوثيقة (03): ساق نبات الطماطم.
- 9..... الوثيقة (04): المظهر المورفولوجي والتركيب النموذجي لأوراق نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.).
- 9..... الوثيقة (05): برعم زهري في نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) في مرحلة الإزهار.
- 10..... الوثيقة (06): رسم تخطيطي مبسط لتشريح زهرة نبات الطماطم.
- 11..... الوثيقة (07): ثمار نبات الطماطم.
- 11..... الوثيقة (08): بذور نبات الطماطم.
- 13..... الوثيقة (09): دورة حياة نبات الطماطم.
- 14..... الوثيقة (10): مراحل النمو لنبات الطماطم ومستويات تلون ونضج الثمار.
- 26..... الوثيقة (11): البنى الكيميائية لبعض المركبات النشطة بيولوجيا في الطماطم.
- 27..... الوثيقة (12): بعض مصادر الليكوبين.
- 28..... الوثيقة (13): البنية الكيميائية لليكوبين.
- 30..... الوثيقة (14): مسار التخليق الحيوي لليكوبين.
- 32..... الوثيقة (15): هيكل بيتا-كاروتين الكيميائي.
- 35..... الوثيقة (16): مسار التخليق الحيوي لبيتا-كاروتين.
- 37..... الوثيقة (17): تصنيف المركبات الفينولية.
- 38..... الوثيقة (18): البنية الكيميائية لحلقة الفينول.
- 40..... الوثيقة (19): أفضل مصادر المركبات الفينولية.
- 41..... الوثيقة (20): مسارات تخليق المركبات الفينولية.
- 51..... الوثيقة (21): موقع ولاية وادي سوف في الجزائر.
- 52..... الوثيقة (22): صورة مأخوذة عبر الأقمار الصناعية توضح موقع زرع العينات.
- 54..... الوثيقة (23): مراحل النضج للثمار المدروسة.
- 56..... الوثيقة (24): المنحنى القياسي للغلوكوز (ميكروغرام/ملل).
- 58..... الوثيقة (25): المنحنى القياسي لحمض الغاليك (ميكروغرام/ملل).
- 62..... الوثيقة (26): صلابة الثمار الطماطم خلال مراحل النضج المختلفة.
- 64..... الوثيقة (27): درجة حموضة مختلف مراحل النضج.
- 65..... الوثيقة (28): محتوى الكربوهيدرات لمراحل النضج الثلاث (RS ، TS ، MG).

66.....	الوثيقة (29): محتوى الفينولات الكلية لمختلف مراحل النضج.
67.....	الوثيقة (30): محتوى الليكوبين في مراحل النضج الثلاث.
69.....	الوثيقة (31): محتوى البيتا-كاروتان في مختلف مراحل النضج (MG, TS, RS).
70.....	الوثيقة (32): محتوى الفيتامين أ في مختلف مراحل النضج (MG, TS, RS).

قائمة الاختصارات

قائمة الاختصارات

DW: مادة جافة

RS: المرحلة الحمراء

TS: المرحلة الملونة.

MG: مرحلة النضج الأخضر

E β C: ملغ مكافئ للبيتا-كاروتين

RE: وحدة ملغ مكافئ الريتينول

مقدمة

يعد غذاء الإنسان الركيزة الأساسية لاستمرار الحياة ونمو الكائنات الحية، إذ يزود الجسم بالعناصر الغذائية والطاقة اللازمة لأداء وظائفه الحيوية. وتحتل الفواكه والخضار مكانة محورية ضمن هذه المنظومة الغذائية، لما تحتويه من مركبات نشطة بيولوجيا كالفينولات والكاروتينويدات والفيتامينات والمعادن، التي تساهم في تعزيز الصحة العامة والوقاية من الأمراض المزمنة (Samtiya et al., 2021). وفي مقدمة هذه الخضروات تأتي الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) التي تحتل المرتبة الثانية بين المحاصيل الخضرية على مستوى العالم بعد البطاطا (FAOSTAT, 2023). وتنتمي إلى الفصيلة الباذنجانية (Solanaceae)، وتصنف ضمن الثمار المناخية (Climacteric) التي تتميز بارتفاع معدل التنفس وإنتاج الإيثيلين في أثناء النضج (Giovannoni, 2001). وهو ما يجعلها نموذجا علميا فريدا لدراسة الفيزيولوجيا والكيمياء الحيوية للثمار.

تتميز ثمار الطماطم بمنظومة متكاملة من المركبات الغذائية والوظيفية، في مقدمتها الليكوبين والبيتا-كاروتين والفينولات والكربوهيدرات والألياف، وهي مركبات لا تتوفر بتركيزات ثابتة عبر مراحل النضج المختلفة، بل تخضع لتحولات بيوكيميائية متسلسلة ومتشابكة تبدأ منذ عقد الثمرة وتستمر حتى اكتمال نضجها (Lima et al., 2022). وتحكم هذه التحولات مسارات أيضية معقدة ينظمها الإيثيلين بوصفه الهرمون المحوري المسؤول عن التنسيق بين عمليات تحلل الكلوروفيل وتخليق الكاروتينويدات وتفكيك الجدار الخلوي وتحول النشا إلى سكريات ذائبة (Quinet et al., 2019)، وكلها عمليات تتكامل لتشكيل الخصائص الغذائية والحسية للثمرة الناضجة.

وعلى المستوى المحلي، تبرز ولاية الوادي بوصفها مركزا إنتاجيا استراتيجيا للطماطم في الجزائر، إذ تمتد مساحة الأراضي المزروعة بهذا المحصول إلى حوالي 3,397 هكتار بإنتاج يقدر بنحو 2,398,000 قنطار (Faci & Bedjaoui, 2023)، وتتميز بظروف مناخية صحراوية فريدة تتيح لها إنتاج الطماطم الحقلية في موسم عكسي مغاير لباقي المناطق الجزائرية، وتصبح بذلك المورد الرئيسي لهذا المنتج على المستوى الوطني خلال فصل الشتاء حين يقل توفر الطماطم في أسواق الشمال (APS, 2022)؛ يومية الاتحاد الجزائرية، 2024). غير أن الأبحاث العلمية المتعلقة بالتغيرات البيوكيميائية والفيزيولوجية التي تطرأ على ثمار الطماطم خلال مراحل نضجها في هذه الظروف المناخية الصحراوية الخاصة لا تزال نادرة، مما يكشف عن فجوة بحثية حقيقية تستدعي المعالجة العلمية المنهجية.

وعليه تطرح إشكالية هذه الدراسة:

كيف تتطور الخصائص الفيزيائية والبيوكيميائية لثمار الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) عبر مراحل نضجها وما المرحلة التي تبلغ فيها كل من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية قيمتها المثلى، والتوقيت الأنسب للحصاد حسب الغرض الإنتاجي والتسويقي؟

وللإجابة عن هذه الإشكالية، تسعى الدراسة إلى تحقيق جملة من الأهداف المتكاملة، أبرزها: رصد التغيرات الفيزيائية المتمثلة في الصلابة ودرجة الحموضة ومحتوى الرطوبة والمادة الجافة عبر مراحل النضج الثلاث، وتقدير المركبات الكيميائية الحيوية النشطة مثل الكربوهيدرات والفينولات وتفسير هذه التغيرات في ضوء المسارات البيوكيميائية خلال مراحل النضج في الثمار.

وقد جاءت هذه الدراسة في جزأين متكاملين: يتناول الجزء النظري في فصله الأول دراسة عامة حول نبات الطماطم وتصنيفه ووصفه المورفولوجي ودورة حياته ومراحل نمو ثماره، وفصله الثاني لاستعراض التركيب البيوكيميائي للثمرة والمركبات النشطة بيولوجيا وأبرز خصائصها وفوائدها. أما الجزء التطبيقي فيعرض في فصله الأول المواد والوسائل والطرق المنهجية المتبعة، ويقدم في فصله الثاني النتائج ومناقشتها مقارنة بالدراسات العلمية السابقة، وختام الدراسة بخلاصة عامة متبعة بتوصيات علمية.

الجزء النظري



الفصل الأول: دراسة نبات الطماطم

(Solanum lycopersicum. L)

1. تعريف الطماطم:

هو نبات يزرع بغرض الحصول على ثمار ناعمة، مستديرة وعصيريته، تشير كلمة الطماطم إلى كل من الفاكهة والنبات (حجاج وخيروش، 2022).

تعد الطماطم، واسمها العلمي *Solanum lycopersicum* L، أكثر أنواع الخضروات زراعة في العالم، والتي تضم أكثر من 4000 صنف. تنتمي الطماطم إلى فصيلة الباذنجانيات (Wakil et al., 2018). وهي نبات عشبي يزرع أساسا من أجل ثماره اللحمية الصالحة للأكل، والتي تعد من المصادر الغذائية الغنية بالفيتامينات والمركبات المضادة للأكسدة مثل الليكوبين والكاروتينات والفينولات. تتميز الطماطم بنموها العشبي المتفرع وأوراقها المركبة وأزهارها الصفراء التي تتجمع غالبا في عناقيد، بينما تصنف ثمارها من الناحية النباتية على أنها نوع من التوت (Berry). وتعد هذه النبتة ذات أهمية اقتصادية وزراعية كبيرة، إذ تزرع على نطاق واسع في معظم مناطق العالم سواء للاستهلاك الطازج أو لأغراض التصنيع الغذائي مثل الصلصات والمعجون والعصائر (Britannica, 2026).

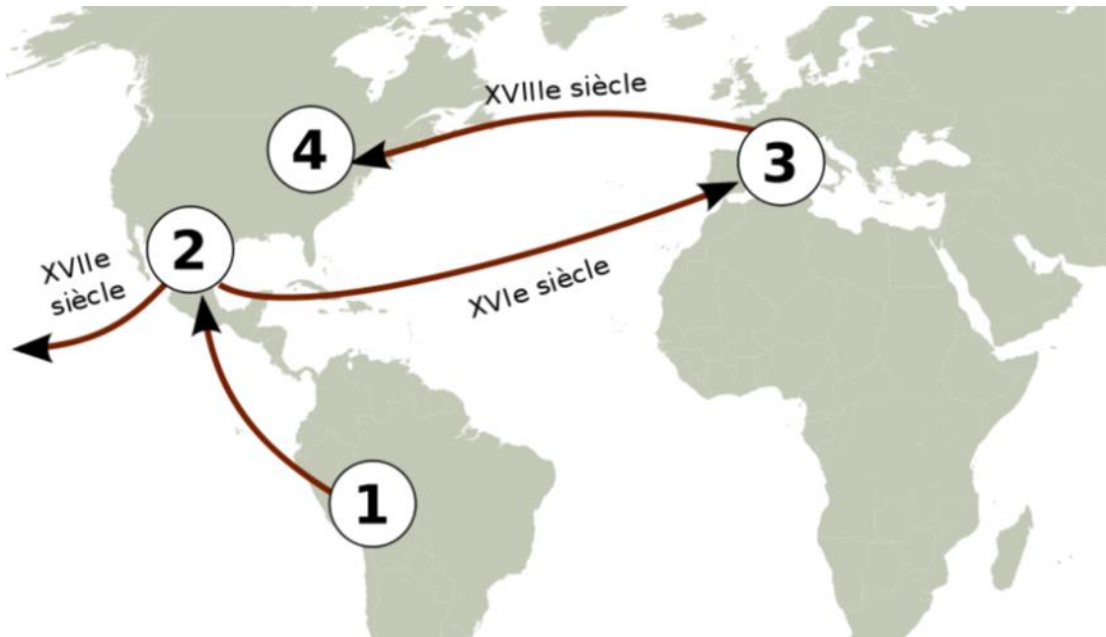
2. تاريخ وموطن الطماطم:

تعد الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) من النباتات التي يعود موطنها الأصلي إلى مناطق أمريكا الوسطى وأمريكا الجنوبية وجنوب أمريكا الشمالية، ممتدة من المكسيك إلى بيرو. وترجع أصول الطماطم البرية إلى منطقة جبال الأنديز في أمريكا الجنوبية، والتي تشمل كلا من بيرو وبوليفيا وتشيلي والإكوادور. ويعتقد الباحثون أن حضارتي الأزتك والإنكا قد قامتتا بزراعة الطماطم منذ حوالي 700 سنة قبل الميلاد، غير أن الثمار التي كانوا يزرعونها كانت تختلف من حيث الحجم والطعم عن الأصناف المزروعة حاليا (Swamy, 2023)، إذ كانت صغيرة الحجم بقطر يتراوح بين 1 و2 سم، ثنائية الحجرات، وذات طعم حامضي واضح (Jenkins, 1948). ورغم أن الأصول الوراثية الأولى لهذا المحصول ترجع إلى منطقة جبال الأنديز في أمريكا الجنوبية، إلا أن منطقة المكسيك كانت مركزا رئيسا لتدجينه وتطويره وراثيا من قبل حضارة الأزتك. اشتق الاسم الشائع عالميا Tomato (طماطم) من اللفظ المكسيكي الأصلي القديم "Tomatl" بلسان قبائل الناهواتل لغة قبائل الأزتك الأصلية في المكسيك والذي يشير مورفولوجيا إلى "الثمرة المستديرة" (Smith, 1994).

انتقلت الطماطم إلى القارة العجوز ضمن ما يعرف بـ "التبادل الكولومبي" (Columbian Exchange) في القرن السادس عشر، عقب الغزو الإسباني للمكسيك عام 1521. وقد دخلت الطماطم أولا إلى إسبانيا وإيطاليا كإحدى العجائب النباتية للعالم الجديد، ولكنها واجهت رفضا أوليا في شمال أوروبا لا اعتقادهم بأنها نبتة سامة (Crosby, 2003). وبحلول منتصف القرن الثامن عشر، بدأت الطماطم تأخذ مكانتها كمكون أساسي في مطبخ حوض البحر الأبيض المتوسط (Atherton & Rudich, 1986).

ارتبط دخول الطماطم إلى القارة الأفريقية وشمال أفريقيا بالنشاط التجاري والاستعماري الأوروبي في حوض المتوسط. فبينما دخلت إلى مصر عبر التأثير الإيطالي والتبادل التجاري في عهد محمد علي باشا، وصلت إلى الجزائر بشكل أكثر تنظيماً خلال القرن التاسع عشر (Labatut, 1982).

توسعت زراعة الطماطم مع بداية الفترة الاستعمارية الفرنسية، حيث تم إدخال أصناف محسنة لزراعتها في سهول المتيجة والمناطق الساحلية (مثل عنابة ووهران) لتلبية احتياجات السوق المحلية والتصدير نحو أوروبا (Chevalier, 1941). وقد ساعد المناخ المتوسطي للجزائر على جعلها واحدة من أهم المحاصيل الاستراتيجية في البلاد، حيث تطورت من نبتة دخيلة إلى محصول وطني أساسي (Labatut, 1982).



الوثيقة (01): المواطن الأولى للطماطم وانتشارها (Techno-Science.net)

1. البيرو 2. المكسيك 3. أوروبا 4. الولايات المتحدة

3. التصنيف النباتي للطماطم:

وفقاً لما أورده Dupont & Guignard (2012) و Spichiger et al. (2004) يمكن عرض

التصنيف العلمي للطماطم كما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول (01): التصنيف العلمي لنبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L).

<i>Plantae</i>	المملكة
<i>Trachenobionta</i>	تحت المملكة
<i>Magnoliophyta</i>	الشعبة
<i>Magnoliopsida</i>	الصف
<i>Asteridae</i>	تحت الصف
<i>Solanales</i>	الرتبة
<i>Solanaceae</i>	الفصيلة
<i>Solanum</i>	الجنس
<i>Solanum lycopersicum</i> L	النوع

4. الوصف المورفولوجي لنبات الطماطم:

1.4 الجذر:

يمتلك نبات الطماطم نظاما جذريا وتديا (Taproot system) يبدأ بجذر أولي ناتج عن الجنين، يتجه عموديا داخل التربة ويعطي جذورا جانبية عديدة تمتد أفقيا. ويساهم هذا النظام الجذري في تثبيت النبات في التربة وامتصاص الماء والعناصر المعدنية الضرورية للنمو. وقد يتحول النظام الجذري إلى جذور ليفية في حالة الإكثار الخضري حيث تنشأ جذور عرضية على الساق (Heuvelink, 2018).



الوثيقة (02): المجموع الجذري للطماطم (Graibeard, 2009).

2.4 الساق:

تتميز ساق نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum L*) بأنها أسطوانية الشكل تقريبا في المقطع العرضي، وعصيرية في المراحل الأولى من النمو ثم تميل إلى التخشب جزئيا مع التقدم في العمر. وتغطي سطح الساق شعيرات غدية وغير غدية بكثافات متفاوتة تبعا للصنف، حيث تفرز الشعيرات الغدية مركبات طيارة وزيتونا ثانوية تمنح النبات رائحته المميزة وتساهم في حمايته من بعض الآفات والحشرات. كما يتميز النبات بنمط نمو صادق المحور (Sympodial growth)، إذ يتحول البرعم القمي بعد مرحلة من النمو الخضري إلى نورة زهرية، بينما يستمر النمو الخضري من خلال البرعم الإبطي الموجود أسفل النورة، والذي ينمو ليكن محورا جديدا يمثل امتدادا وظيفيا للمحور الرئيسي للنبات (Bergau et al., 2015; Brewer et al., 2007). وتصنف طبيعة نمو الساق إلى نمطين أساسيين: إما محدودة النمو، وهي التي تنتهي قممها بنورة زهرية توقف استطالتها، أو غير محدودة النمو، حيث لا تنتهي القمة بنورة زهرية مما يسمح باستمرار الاستطالة، ومع تقدم النبات في العمر، تميل هذه السيقان نحو التخشب (ضنيات ومصباحي، 2019).



الوثيقة (03): ساق نبات الطماطم (www.quelleestcetteplante.fr).

3.4 الأوراق:

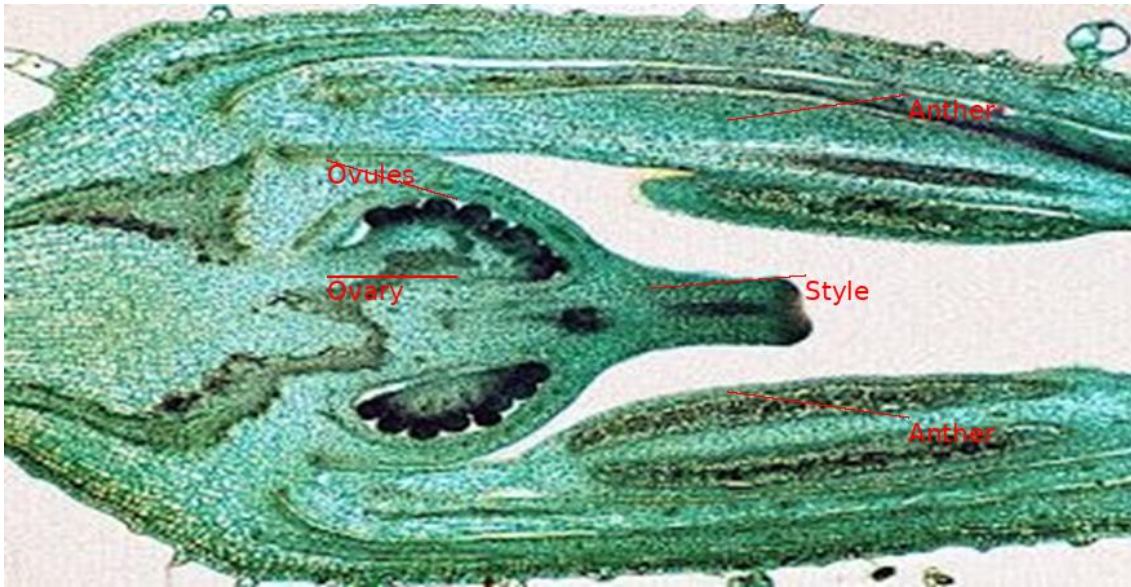
أوراق نبات الطماطم مركبة ريشية طرفية مفردة (imparipinnate)، وتتكون عادة من 5 إلى 7 وريقات رئيسية إضافة إلى وريقات صغيرة بينية، وتكون حوافها مسننة قليلا. ويتراوح طول الورقة عادة بين 10 و25 سم، كما تتوزع الأوراق بشكل متبادل على الساق، وغالبا ما يكون سطحها مغشى بشعيرات دقيقة (Heuvelink, 2018).



الوثيقة (04): المظهر المورفولوجي والتركيب النموذجي لأوراق نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.) (Swartzberg et al., 2011).

4.4 النورات:

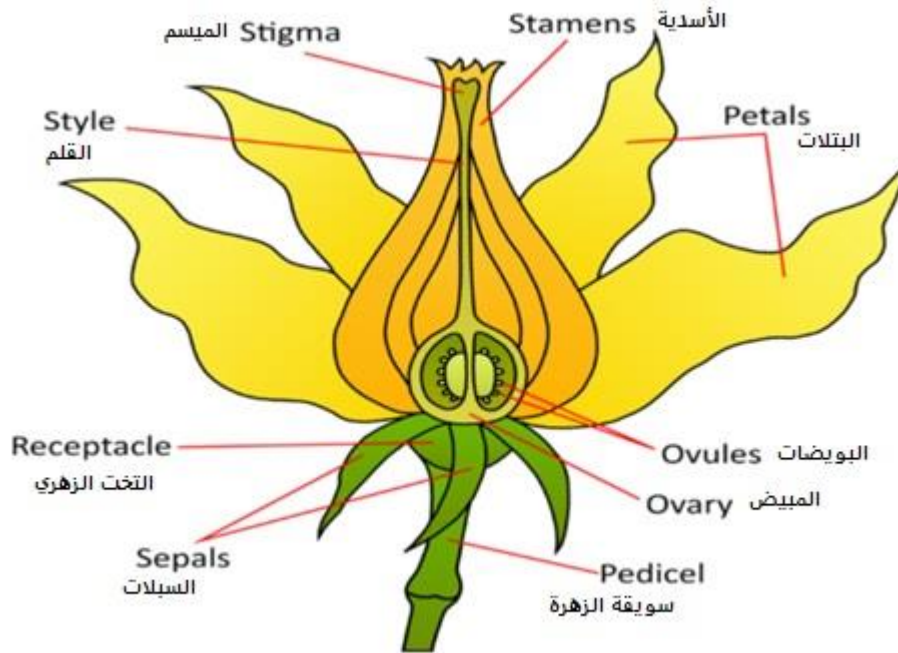
تظهر النورات في نبات الطماطم على شكل عناقيد زهرية تتكون في آباط الأوراق. وقد تكون النورة بسيطة أو متفرعة حسب الصنف، وتضم عادة عدة أزهار تتفتح تدريجياً. وغالباً ما تتكون النورة الأولى بعد ظهور عدد من الأوراق على الساق الرئيسية، مما يدل على انتقال النبات من النمو الخضري إلى النمو التكاثري (Heuvelink, 2018).



الوثيقة (05): برعم زهري في نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.) في مرحلة الإزهار (حسني، 2015).

5.4 الأزهار:

تنمو أزهار نبات الطماطم في تجمعات زهرية (نورات) يتراوح عددها ما بين 4 إلى 12 زهرة، حيث يصل قطر الزهرة الواحدة إلى حوالي 2 سم، وتتألف من 6 بتلات صفراء اللون بطول 1 سم تقريبا. تظهر هذه الأزهار عند أباط الأوراق (نقطة اتصال الورقة بالساق)، وتتميز بكونها أزهارا خنثى تحتوي على أعضاء ذكرية (أسدية) وأعضاء أنثوية (متاع). يتكون الجهاز الذكري من 6 أسدية بمتوك صفراء زاهية تحيط بالقلم، بينما يتألف الجهاز الأنثوي من الميسم والقلم والمبيض، ويصنف مبيضها بأنه مبيض علوي يحتوي على ما بين 2 إلى 9 كربلات. وبالرغم من أن نبات الطماطم يعتمد بشكل أساسي على التلقيح الذاتي، إلا أن التلقيح الخلطي قد يحدث بواسطة الملقحات الحشرية مثل النحل والطنان (Bouzghaya & Omane, 2024).



الوثيقة (06): رسم تخطيطي مبسط لتشرح زهرة نبات الطماطم (Baranov et al., 2024).

6.4 الثمار:

ثمرة الطماطم هي ثمرة لحمية من نوع التوت، تتكون من جدار ثمرى يحيط بأنسجة هلامية تحتوي على البذور. وتختلف الثمار في الشكل والحجم واللون وعدد الحجرات الداخلية تبعا للصنف، إذ قد تكون مستديرة أو مفلطحة أو بيضوية الشكل، كما قد يتراوح لونها بين الأحمر والبرتقالي أو الأصفر عند النضج (Heuvelink, 2018).



الوثيقة (07): ثمار نبات الطماطم (Kimura & Sinha, 2008).

7.4 البذور:

تحتوي ثمرة الطماطم على عدد كبير من البذور، يختلف عادة بين 80 و 500 بذرة لكل ثمرة، تكون بذور الطماطم (*Solanum lycopersicum L*) صغيرة بيضوية مفلطحة، طولها نحو 5 مم، وعرضها حوالي 4 مم، وسمكها حوالي 2 مم. تتكون أساساً من الجنين والإندوسبيرم وغلاف البذرة (التست)، ويغطي هذا الغلاف عدد من الشعيرات الناعمة التي تساعد على إلتصاق البذور ببعضها، كما تكون مغطاة بمادة مخاطية (ميوسيلاج) تحمي الجنين والإندوسبيرم وتسهل عملية الإنبات. عند النضج، يظهر الجنين والإندوسبيرم على شكل مقوس، ويتميز الإنبات بأنه سطحي (Epigeal) حيث يظهر البرعم فوق سطح التربة (Heuvelink, 2018; Bouzghaya & Omane, 2024).



الوثيقة (08): بذور نبات الطماطم (Melo, 1989).

5. دورة حياة نبات الطماطم:**1.5 مرحلة الإنبات:**

تبدأ هذه المرحلة فسيولوجيا بعملية "التشرب" (Imbibition) حيث تمتص البذرة الماء، مما يؤدي إلى تنشيط الإنزيمات وبدء خروج الجذير (Radicle). يتبع ذلك نمو السويقة تحت الفلقة (Hypocotyl) التي تتخذ شكل القوس لتدفع الفلقات (Cotyledons) فوق سطح التربة. تنتهي هذه المرحلة بمجرد انفتاح الفلقات وبدء عملية التمثيل الضوئي الأولية (Heuvelink, 2018).

2.5 مرحلة النمو الخضري:

تتميز هذه المرحلة بتكوين الأوراق الحقيقية (True leaves) وتفرع المجموع الجذري. يعتمد النبات في هذه الفترة على بناء "المصدر" (Source) وهو المجموع الخضري القوي الذي سيمد الثمار لاحقا بالطاقة. يتم رصد نمو الساق (Stem elongation) وزيادة مساحة المسطح الورقي (Leaf area index) كدليل على قوة هذه المرحلة. (Heuvelink, 2018).

3.5 مرحلة الإزهار:

تبدأ بتحول القمة النامية من الحالة الخضرية إلى الحالة التكاثرية لتكوين العناقيد الزهرية (Inflorescences). زهرة الطماطم هي زهرة كاملة (Hermaphrodite)، وتعتبر الظروف البيئية وخاصة درجات الحرارة الليلية هي المحدد الأساسي لنجاح تكوين هذه الأزهار وتمايزها. (Causse et al., 2016).

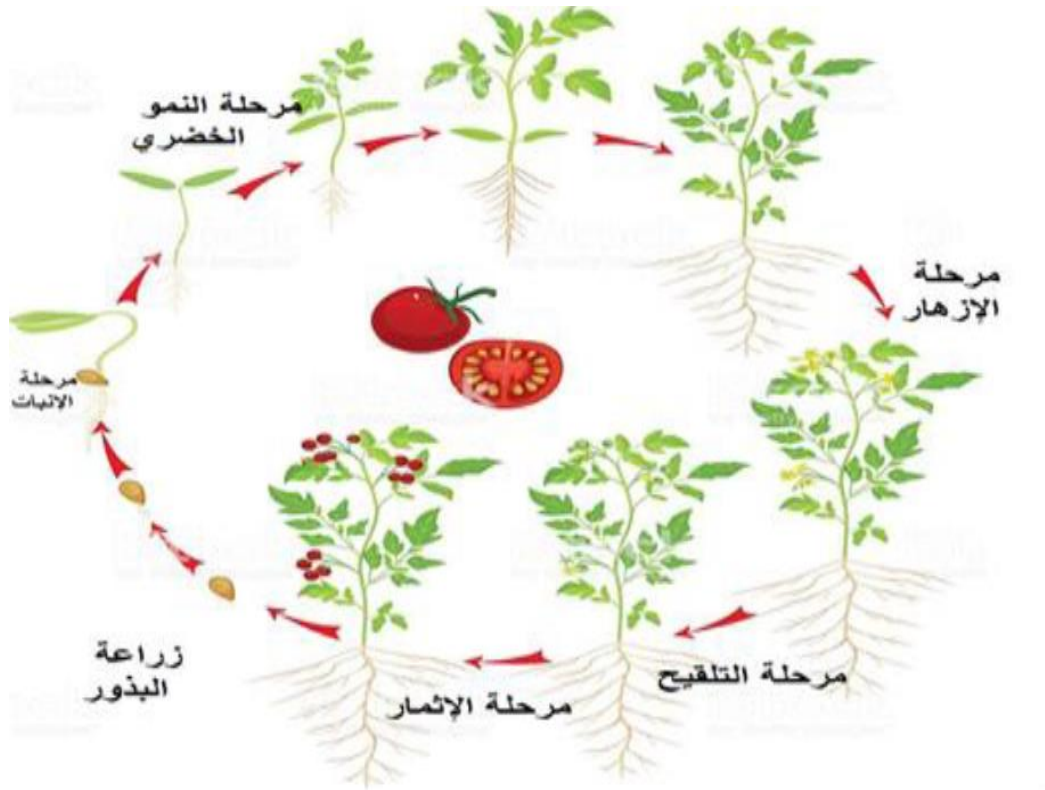
4.5 مرحلة التلقيح والإخصاب:

تحدث عملية التلقيح (Pollination) بانتقال حبوب اللقاح من المتك إلى الميسم داخل نفس الزهرة (تلقيح ذاتي). يتبع ذلك مباشرة "الإخصاب" (Fertilization) وهو اندماج المشيج الذكري مع البويضة لتكوين الزيجوت. نجاح هذه المرحلة هو الذي يمنع تساقط الأزهار ويضمن الانتقال للمرحلة التالية. (Heuvelink, 2018).

5.5 مرحلة الإثمار:

بعد حدوث الإخصاب يبدأ المبيض في النمو والتحول تدريجيا إلى ثمرة الطماطم، وهي عملية تعرف بعقد الثمار. خلال هذه المرحلة تنقسم خلايا جدار المبيض ثم تتمدد، مما يؤدي إلى زيادة حجم الثمرة تدريجيا. في الوقت نفسه تبدأ البذور في التطور داخل الثمرة، وتحدث عدة تغيرات فسيولوجية وكيميائية تشمل تراكم

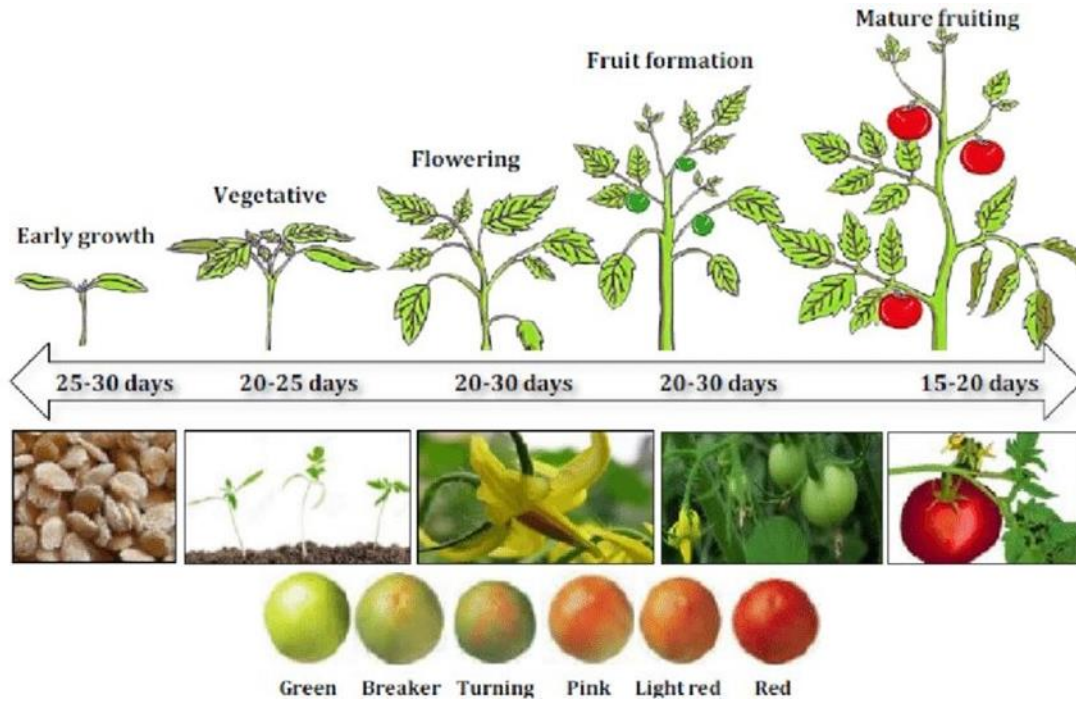
السكريات والأحماض العضوية والأصبغ النباتية. ومع استمرار التطور تصل الثمرة في النهاية إلى مرحلة النضج التي تتميز بتغير اللون وازدياد الطعم المميز للثمار (Quinet et al., 2019).



الوثيقة (09): دورة حياة نبات الطماطم (<https://www.dreamstime.com>)

6. مراحل تكوين ونمو ثمار نبات الطماطم:

تتكون ثمرة الطماطم من مبيض الزهرة بعد حدوث عمليتي التلقيح والإخصاب، وتمر خلال تطورها بعدة مراحل فسيولوجية ومورفولوجية متتالية تشمل تشكل الثمار ثم نموها وأخيرا نضجها. وتتميز هذه المراحل بحدوث تغيرات تشريحية وكيميائية حيوية مهمة مثل انقسام الخلايا واستطالتها وتراكم المواد العضوية وتحلل الكلوروفيل وتكوين الأصباغ الكاروتينية، وتخضع هذه العمليات لتنظيم هرموني معقد خاصة بواسطة الأوكسينات والجبريلينات والإيثيلين. وتعد معرفة مراحل تكوين ونمو ونضج الثمار أمرا مهما لفهم تطور الثمار وتحسين الإنتاجية وجودة المحصول وتحديد موعد الحصاد المناسب (Quinet et al., 2019).



الوثيقة (10): مراحل النمو لنبات الطماطم ومستويات تلون ونضج الثمار (Shamshiri et al., 2018).

1.6 مرحلة تشكل الثمار:

تعد مرحلة تشكل الثمار المرحلة الأولى من مراحل تطور ثمار الطماطم، وتبدأ منذ تكوين الأزهار وحتى عقد الثمار، حيث يتم خلالها تكوين البذور والأنسجة الأولى للثمرة. وتتميز هذه المرحلة بزيادة النشاط الهرموني الذي يحفز انقسام الخلايا ونمو المبيض وتحوله إلى ثمرة، كما تتأثر هذه المرحلة بشكل كبير بالعوامل البيئية مثل درجة الحرارة والرطوبة والتغذية المعدنية، ويؤدي أي خلل في هذه الظروف إلى ضعف عقد الثمار أو تساقط الأزهار (Quinet et al., 2019).

1.1.6 الإزهار:

تبدأ عملية تكوين الثمار بمرحلة الإزهار حيث تتمايز القمم المرستيمية إلى براعم زهرية تتطور إلى أزهار كاملة تحتوي على الأعضاء التكاثرية الذكرية والأنثوية. يحتوي مبيض الزهرة على البويضات، والتي ستتحول بعد الإخصاب إلى بذور، كما يحدد عدد البويضات عدد البذور داخل الثمرة، وهو عامل مهم في حجم الثمرة لاحقاً. وتخضع هذه المرحلة لتنظيم هرموني وجيني يتحكم في نمو الأزهار وتطورها (Fenn & Giovannoni, 2021). تعد مرحلة الإزهار نقطة الانطلاق الحرجة في دورة حياة الثمرة، إذ تتفتح الأزهار ذات اللون الأصفر لتتحول لاحقاً إلى ثمار خضراء صغيرة عقب التلقيح. وتؤثر الظروف البيئية تأثيراً بالغاً في نجاح هذه المرحلة؛ فتعشل عملية التلقيح عند درجات حرارة نهائية تتجاوز 29.5

درجة مئوية بسبب تلزج حبوب اللقاح، وتتساقط الأزهار عند انخفاض درجة الحرارة الليلية دون 13 درجة مئوية، وتُعدّ درجة الحرارة المثلى للإزهار بين 21 و24 درجة مئوية (Quinet *et al.*, 2019).

2.1.6 الإخصاب:

تتم عملية التلقيح من خلال نمو أنبوبة اللقاح من الميسم عبر القلم، حيث تخترق فجوة نسيج الميسم لتصل إلى البويضات داخل المبيض، وهناك يحدث اتحاد الأمشاج الذكرية والأنثوية لتكوين اللاقحة التي تتطور إلى جنين داخل البذرة (ضنيات ومصباحي، 2019). ويؤدي هذا الإخصاب إلى تحفيز انقسام خلايا المبيض وتمايز أنسجته نتيجة زيادة تركيز الهرمونات النباتية، لا سيما الأوكسينات والجبريلينات، مما يطلق إشارة البدء للنمو المبكر للجنين وتطور المبيض إلى ثمرة نامية (Kai *et al.*, 2019).

3.1.6 عقد الثمار:

تنقسم عملية تطور ثمرة الطماطم إلى أربع مراحل متميزة هي: عقد الثمار، والانقسام الخلوي، والتوسع الخلوي، ونضج الثمرة؛ حيث تتطلب هذه المراحل تنسيقاً دقيقاً بين العوامل الجينية والهرمونية عبر مسارات معقدة (Molesini *et al.*, 2020). وتمثل مرحلة عقد الثمار نقطة التحول المحورية من المبيض الساكن إلى ثمرة نامية، وهو تحول يحفز النشاط المشترك للأوكسينات والجبريلينات كمحركين رئيسيين لهذه العملية (Serrani *et al.*, 2007). وفي هذه المرحلة، تبدأ الخلايا بالانقسام السريع لتكوين الأنسجة الأولية للثمرة (الإندوكارب، الميزوكارب، والإبيكارب)، بالتزامن مع بدء تكون البذور التي تلعب دوراً حيوياً في إفراز الهرمونات المحفزة للنمو. علماً أن نجاح هذه المرحلة شديد الحساسية للظروف البيئية المحيطة، لا سيما درجات الحرارة وتوفر الرطوبة (Quinet *et al.*, 2019).

2.6 مرحلة نمو الثمرة:

تتميز مرحلة نمو الثمرة بزيادة حجم ووزن الثمار نتيجة انقسام الخلايا في البداية ثم استطالة الخلايا وتضخمها في المراحل اللاحقة، كما تتراكم المواد العضوية مثل السكريات والأحماض العضوية داخل خلايا الثمرة. ويتميز نمو الثمرة بمنحنى نمو سيغمويدي يمر بمرحلة نمو بطيء ثم نمو سريع ثم استقرار في الحجم، وفي نهاية هذه المرحلة تصل الثمرة إلى طور النضج الأخضر (Fenn & Giovannoni, 2021).

1.2.6 النمو الخضري للثمار:

تمثل هذه المرحلة الفترة الزمنية الممتدة من عقد الثمرة حتى اكتمال حجمها النهائي، وتتميز بنمو سريع ومتواصل ناتج عن انقسام الخلايا ثم استطالتها وتضخمها. خلال هذا الطور، تزداد الكتلة الطازجة

للثمرة بشكل ملحوظ نتيجة تراكم المياه والمواد العضوية داخل الخلايا (Quinet *et al.*, 2019). وتعمل الثمرة في هذه المرحلة كمستقبل (Sink) نشط للمواد الغذائية، حيث يتم استقطاب النيتروجين والمعادن والمركبات الكربوهيدراتية القادمة من الأوراق عبر اللحاء (Phloem)، بالإضافة إلى تراكم الأحماض العضوية كحمض الستريك والماليك (Molesini *et al.*, 2020). وتصل الثمرة في نهاية هذه المرحلة إلى حجمها النهائي تقريباً، وتكون صلبة القوام وذات لون أخضر مميز نتيجة المحتوى المرتفع من الكلوروفيل في البلاستيدات الخضراء، بينما تستمر البذور في تطورها الداخلي (Gillaspy *et al.*, 1993).

2.2.6 طور النضج الأخضر:

في هذا الطور، تدخل الثمرة مرحلة النضج الأخضر (MG) وتبلغ حجمها النهائي الذي يتباين تبايناً كبيراً بين الأصناف ويتأثر بدرجة عالية بالعوامل البيئية (Mapelli *et al.*, 1978). وتنتم هذه المرحلة من الخارج باكتساء الثمرة اللون الأخضر الفاتح مع تلون جزء الثمرة من ناحية الطرف الزهري بلون كريمي فاتح (ضنيات ومصباحي، 2019). وتحدث خلالها عدة تغيرات فسيولوجية مثل تكوين الإيثيلين وبدء تحلل النشا وتحوله إلى سكريات بسيطة، كما تنهياً الأنسجة لمرحلة النضج من خلال تغير النشاط الأنزيمي وزيادة التنفس (Fenn & Giovannoni, 2021).

3.6 نضج الثمار:

تعد مرحلة نضج الثمار المرحلة الأخيرة من تطور ثمار الطماطم، وتتميز بحدوث تغيرات فسيولوجية وكيميائية حيوية تؤدي إلى تحسين صفات الثمرة من حيث اللون والطعم والرائحة والملمس. وتعد الطماطم من الثمار المناخية التي يزداد فيها معدل التنفس وإنتاج الإيثيلين أثناء النضج، وهو الهرمون المسؤول عن تنظيم هذه العملية (Quinet *et al.*, 2019).

1.3.6 طور ابتداء التلوين:

تصنف الطماطم وفق نظام التدرج اللوني المعياري لوزارة الزراعة الأمريكية (USDA) إلى ست مراحل للنضج تبدأ بالأخضر وتنتهي بالأحمر الكامل، مروراً بمراحل وسيطة تشمل: المرحلة الانتقالية (Breakers)، والانعطاف (Turning)، والزهري (Pink)، والأحمر الفاتح (Light Red) (Skollik *et al.*, 2019). ويعرف طور ابتداء التلوين بظهور تحول لوني واضح على مساحة لا تزيد عن 10% من سطح الثمرة، وهو ما يعكس تحول البلاستيدات الخضراء إلى بلاستيدات ملونة (Skollik *et al.*, 2019).

وعلى الصعيد البيوكيميائي، تنتم هذه المرحلة ببدء تحلل الكلوروفيل وشرع الثمرة في تخليق الكاروتينات، لاسيما صبغة الليكوبين المسؤولة عن اللون الأحمر، (Gupta & Bhatt, 2022). كما

يصاحب هذه التحولات الهيكلية زيادة ملحوظة في معدل التنفس وإنتاج غاز الإيثيلين، الذي يلعب الدور المحوري في تنظيم وتنسيق كافة عمليات النضج اللاحقة (Quinet *et al.*, 2019).

2.3.6 طور تلون ثلاثة أرباع الثمرة:

تتحدد مراحل نضج ثمار الطماطم خارجيا من خلال نسب التغطية اللونية؛ حيث تمثل مرحلة الانعطاف (Turning) تغيرا لونها يتراوح بين 10% و30% من سطح الثمرة، تليها المرحلة الزهرية (Pink) بنسبة تغطية تتراوح بين 30% و60%، وصولا إلى طور الأحمر الفاتح (Light Red) الذي يغطي ما بين 60% و90% من السطح (Skolik *et al.*, 2019). وتسمح الخصائص الطيفية لهذه المراحل بتمييزها بدقة تصنيفية تتراوح بين 99% و100% (Skolik *et al.*, 2019).

تتزامن هذه التغيرات المورفولوجية مع تسارع في المسارات الحيوية لتخليق الكاروتينات، ولا سيما الليكوبين، وارتفاع تركيز السكريات الذائبة الناتج عن التحلل المائي للنشا (Quinet *et al.*, 2019). كما يطرأ انخفاض في محتوى الأحماض العضوية تزامنا مع فقدان قساوة الأنسجة (Fruit Firmness)؛ نتيجة التفكك الأنزيمي للمواد البكتينية في الجدران الخلوية، مما يؤدي إلى تليين النسيج الثمري وصلاحيته للاستهلاك (Fenn & Giovannoni, 2021).

3.3.6 طور تمام النضج:

تمثل هذه المرحلة الطور الأخير لتطور الثمرة، حيث يغطي اللون الأحمر أكثر من 90% من سطحها الخارجي، مما يجعلها في الحالة المثالية للاستهلاك المباشر أو التصنيع الغذائي (Gupta & Bhatt, 2022). ويخضع هذا التحول الجذري لتأثير هرمون الإيثيلين بشكل أساسي، والذي يعمل كمحفز للتعبير الجيني المسؤول عن سلسلة من التغيرات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية المتزامنة (Quinet *et al.*, 2019).

وتشمل هذه التغيرات تراكم المواد الصلبة الذائبة والسكريات مقابل تراجع في تركيز الأحماض العضوية، بالإضافة إلى التغيير النهائي في الأصباغ وتخليق المركبات الطيارة (Volatile compounds) المسؤولة عن النكهة والرائحة المميزة للطماطم (Giovannoni, 2004). وبذلك، تكتمل القيمة الغذائية والصفات الحسية والقوام المطلوب، لتصبح الثمرة جاهزة للحصاد النهائي.

7. الأمراض والآفات:

1.7 الأمراض:

تشمل أمراض الطماطم أمراضاً فطرية وبكتيرية وفيروسية إضافة إلى اضطرابات فسيولوجية ناتجة عن العوامل البيئية أو نقص العناصر الغذائية، وتؤثر هذه الأمراض على نمو النبات وإنتاجيته وجودة الثمار، حيث يوضح هذا الجدول بعض وأهم هذه الأمراض:

الجدول (02): الأمراض والاضطرابات الفسيولوجية لنبات الطماطم (Almeida &

.(Sakata & Sora, 2022؛Oliveira, 2025

المرض	المسبب	الأعراض
الأمراض والاضطرابات الفسيولوجية		
الإجهاد المائي	نقص أو زيادة الري	ذبول النبات ونقص الإنتاجية.
الإجهاد الحراري	ارتفاع درجة الحرارة	تساقط الأزهار وضعف عقد الثمار وتشققها
نقص الكالسيوم	خلل غذائي	يسبب تعفن الطرف الزهري للثمار حيث يتحول الجزء السفلي للثمرة إلى لون بني متعفن.
نقص النيتروجين	نقص عنصر غذائي	اصفرار عام في الأوراق مع بطء واضح في نمو النبات.
نقص البورون	خلل تغذية معدنية	تشوه الثمار وضعف نمو القمم النامية.
الأمراض الفطرية		
اللحفة المبكرة	<i>Alternaria solani</i>	تظهر بقع بنية داكنة على الأوراق غالباً بشكل حلقات متداخلة، ثم تصفر الأوراق تدريجياً وقد تسقط مما يضعف النبات.
اللحفة المتأخرة	<i>Phytophthora infestans</i>	تبدأ ببقع مائية داكنة على الأوراق والسيقان ثم تنتشر

بسرعة وقد تؤدي إلى تلف النبات بالكامل.		
تظهر على الثمار بقع داكنة غائرة تكبر تدريجياً وتسبب تعفن الثمرة.	<i>Colletotrichum spp.</i>	الأنثراكوز
يتكون نمو فطري رمادي على الأنسجة المصابة ويؤدي إلى تعفن الأوراق أو الثمار.	<i>Botrytis cinerea</i>	العفن الرمادي
تظهر مناطق لينة ومتعفنة على الساق مع نمو أبيض قطني حولها.	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	العفن الأبيض
طبقة مسحوقية بيضاء على الأوراق مع ضعف تدريجي في نمو النبات.	<i>Oidium lycopersici / Oidiopsis sicula</i>	البياض الدقيقي
اصفرار الأوراق السفلية وذبول النبات تدريجياً بسبب انسداد الأوعية الناقلة.	<i>Fusarium oxysporum</i>	ذبول الفيوزاريوم
ذبول بطيء للنبات مع اصفرار الأوراق وظهور ضعف عام في النمو.	<i>Verticillium dahliae</i>	ذبول الفريسيليوم
الأمراض البكتيرية		
بقع نخرية على الأوراق وتشقق في السيقان والثمار مع ضعف عام في النبات.	<i>Clavibacter michiganensis</i>	التقرح البكتيري
ذبول مفاجئ للنبات حتى مع توفر الماء نتيجة انسداد الأوعية	<i>Ralstonia solanacearum</i>	الذبول البكتيري
بقع صغيرة داكنة على الأوراق وقد تمتد إلى الثمار.	<i>Xanthomonas spp.</i>	البقعة البكتيرية

البقعة البكتيرية الصغيرة	<i>Pseudomonas syringae</i> <i>pv. tomato</i>	بقع سوداء صغيرة على الأوراق والثمار يحيط بها هالة صفراء.
الأمراض الفيروسية		
التبقرش	<i>Tobacco Mosaic Virus</i>	تظهر الأوراق بنمط فسيفسائي بين الأخضر والأصفر مع تشوه بسيط في النمو.
فيروس تجعد الأوراق الصفراء (TYLCV)	<i>Bemisia tabaci</i>	توقف نمو النبات، تشوهات في الأوراق، يؤدي هذا إلى صغر حجم الورقة واصفرارها.

2.7 الآفات:

تعرف الآفات بأنها عبارة عن أي كائن حي يصيب الإنسان أو الحيوان أو النبات ويسبب له ضرراً، فالحشرات من الآفات وكذلك الميكروبات، الحيوانات الزراعية، الطفيليات، الطيور، القواقع والقوارض، ونبات الطماطم عرضة للعديد منها، والآفات الحشرية تنصدر قائمة الآفات التي تصيبه والجدول (3) يوضح أهم هذه الآفات (حجاج وخيروش، 2022):

الجدول (03): آفات نبات الطماطم (Sakata & Sora, 2022)؛ Almeida & Oliveira, (2025)

الآفة	الحشرة المسببة لها	الأعراض
حفار أوراق الطماطم	<i>Tuta absoluta</i>	تقوم اليرقات بحفر أنفاق داخل الأوراق والثمار مما يؤدي إلى جفافها وتلفها.
الذبابة البيضاء	<i>Bemisia tabaci</i>	تمتص العصارة من الأوراق وتفرز مادة لزجة تشجع نمو العفن الأسود.

الأكاروس	العناكب الدقيقة	يسبب بقع صفراء صغيرة على الأوراق ثم جفافها تدريجيا
----------	-----------------	--

8. إنتاج نبات الطماطم:

1.8 في العالم:

تعد الطماطم (*Solanum lycopersicum L*) من أكثر الخضروات استهلاكاً وإنتاجاً في العالم، إذ تحتل المرتبة الأولى بين محاصيل الخضروات الثمرية من حيث الحجم الإجمالي للإنتاج. وقد شهد هذا المحصول نموا ملحوظا وتضاعفا خلال العقود الأخيرة، متجاوزا عتبة 192 مليون طن عام 2023 مقارنة بنحو 28 مليون طن فقط عام 1961، وهو ما يمثل تضاعف سبعة أضعاف خلال ستة عقود (Ritchie *et al.*, 2023; FAO, 2023).

2.8 في الجزائر وولاية الوادي:

تحتل الجزائر مكانة متقدمة في إنتاج الطماطم على المستويين العربي والأفريقي، مستفيدة من تنوع تضاريسها المناخية ومن الاستثمارات المتزايدة في قطاع الزراعات المحمية خلال السنوات الأخيرة. وتتميز ولاية الوادي بموقع استراتيجي فريد في خريطة الإنتاج الزراعي الوطني، إذ تنفرد بإنتاج الطماطم الحقلية خارج البيوت البلاستيكية في موسم عكسي مغاير تماما لباقي المناطق الجزائرية. تزرع الطماطم خلال شهري أغسطس وسبتمبر لتجنى وتُسوق خلال أشهر ديسمبر ويناير وفبراير، وهي الفترة التي تشح فيها الطماطم في أسواق الشمال الجزائري، مما يجعل ولاية الوادي المورد الرئيسي لهذا المنتج على مستوى كامل ولايات الوطن (APS, 2022 ؛ يومية الاتحاد الجزائرية، 2024).

كما يوضح الجدول الموالي تطور انتاج الطماطم في ولاية الوادي:

الجدول (04): تطور انتاج الطماطم في ولاية الوادي. (DSA, 2026)

السنة	الطماطم		
	المساحة (هـ)	الإنتاج (ق)	المردودية (ق/هـ)
2021	4365	3292230	754.23
2022	3680	2550000	692.93
2023	3676	2541120	691.27

2024	3691	2622700	710.57
2025	3329	2470580	742.14

9. أهمية نبات الطماطم:

تعد الطماطم محصولا عالميا هاما يزرع على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم (Quezada *et al.*, 2022)، نظرا لما تتمتع به من أهمية غذائية واقتصادية وصناعية كبيرة. فمن الناحية الاقتصادية تعد من أكثر الخضار إنتاجا وتداول عالميا، كما تحتل مكانة بارزة في التجارة الزراعية وفي قطاع الصناعات الغذائية، حيث تدخل في إنتاج العديد من المنتجات مثل الصلصات والعصائر والمعجون والمعلبات، وهو ما يجعلها محصولا ذا قيمة اقتصادية عالية في الزراعة والصناعات التحويلية. أما من الناحية الغذائية فتتميز الطماطم بتركيب غني بالعناصر الأساسية مثل فيتامين C والبوتاسيوم وحمض الفوليك، إضافة إلى مركبات كاروتينويدية مهمة وعلى رأسها الليكوبين الذي يعمل كمضاد أكسدة قوي ويساهم في الوقاية من الأمراض المزمنة مثل أمراض القلب وبعض أنواع السرطان. ولا تقتصر أهمية الطماطم على المجال الغذائي فقط، بل تمتد أيضا إلى مجالات صناعية وبحثية متعددة، إذ تستخدم مكوناتها ومخلفات تصنيعها في الصناعات الدوائية والتجميلية وإنتاج المركبات الحيوية، كما تعد نموذجا مهما في الأبحاث الزراعية والبيوتكنولوجية نظرا لسهولة دراستها وتحسين صفاتها الوراثية (Sattar *et al.*, 2024؛ Ali *et al.*, 2020).

الفصل الثاني: بيوكيمياء الطماطم

1. القيمة الغذائية لنبات الطماطم:

تكتسب ثمار الطماطم (*Solanum lycopersicum*) أهمية استراتيجية في التغذية البشرية نظرا لتركيبها الكيميائي المتوازنة التي تجمع بين العناصر الغذائية الكبرى والدقيقة. وعلى الرغم من أن المحتوى المائي يشكل النسبة الغالبة من الكتلة الحيوية للثمار، إلا أنها تعد مستودعا حيويا للفيتامينات، والأملاح المعدنية، والألياف الغذائية التي تساهم في تلبية الاحتياجات اليومية للجسم. وتتجلى القيمة التغذوية للطماطم في انخفاض محتواها السكري مقابل غناها بالمركبات الوظيفية التي ترفع من جودتها الغذائية كعنصر أساسي في النظم الغذائية المتوازنة (FAO & WHO, 2019). ويوضح الجدول (04) التقديرات الكمية للمكونات الغذائية الأساسية في 100 غرام من الطماطم الطازجة.

جدول (05): القيمة الغذائية للطماطم في 100 غ من الطماطم الخام (Ali et al., 2020)

المواد الغذائية	الكميات
سعيرات حرارية	34.67 سعرا حراريا
ماء	94.52 غراما
بروتين	0.88 غرام
الكربوهيدرات	3.89 غرامات
الألياف الغذائية	1.2 غرام
الدهون	0.2 غرام
بوتاسيوم	237 ملليغراما
صوديوم	5 ملليغرامات
زنك	0.17 ملليغرام
كالسيوم	10 ملليغرامات
حديد	0.27 ملليغرام
منغنيسيوم	11 ملليغرام
فسفور	24 ملليغراما
فيتامين C	13.7 ملليغراما
فيتامين B1	0.037 ملليغرام
فيتامين B2	0.019 ملليغرام
فيتامين B3	0.594 ملليغرام
فيتامين B6	0.080 ملليغرام

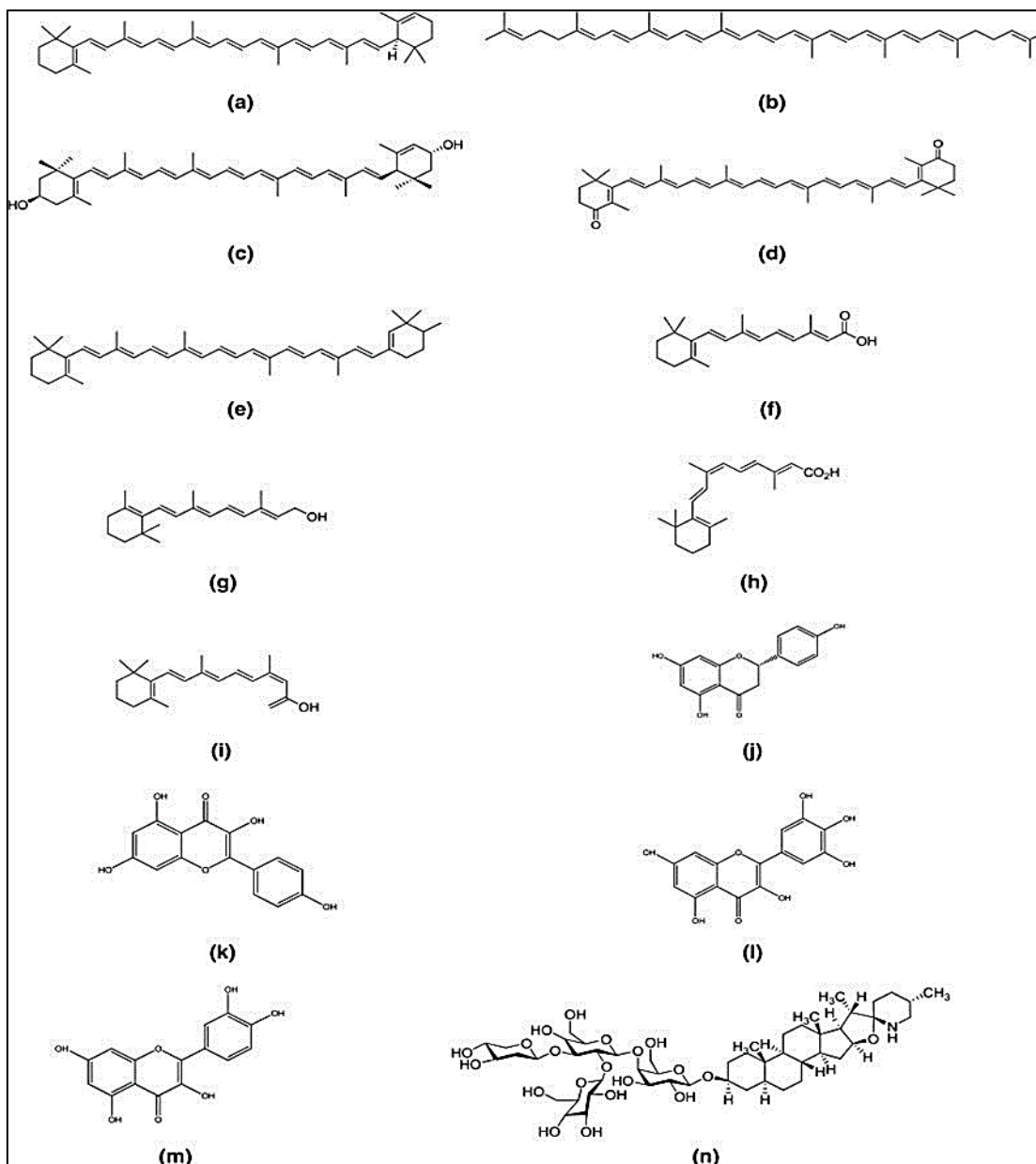
فيتامين B12	0 ميكروغرام
حمض الفوليك	15 ميكروغرام
فيتامين A	833 وحدة دولية
فيتامين K	7.9 ميكروغرامات
فيتامين E	0.54 ملليغرام

2. التركيب الكيميائي لنبات الطماطم:

يتميز نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) بتركيب كيميائي غني ومتنوع يجعله من المحاصيل الغذائية ذات القيمة البيولوجية المرتفعة. وتعد الكاروتينويدات من أبرز المركبات الحيوية الموجودة في ثمار الطماطم، وعلى رأسها الليكوبين الذي يمثل الصبغة الرئيسية المسؤولة عن اللون الأحمر المميز للثمار الناضجة، كما يوجد إلى جانبه عدد من الكاروتينويدات الأخرى مثل بيتا-كاروتين واللوتين والفيتونين ولكن بتركيز أقل نسبياً (Chaudhary et al., 2018; Perveen et al., 2015).

إضافة إلى ذلك، تحتوي الطماطم على مجموعة واسعة من المركبات الفينولية التي تشمل الأحماض الفينولية والفلافونويدات، ومن أبرزها حمض الكلوروجينيك وحمض الكافيك، فضلاً عن فلافونويدات مثل الكيرسيتين والنارينجين وشالكون النارينجين، الذي يعد من أكثر الفلافونويدات وفرة في ثمار الطماطم، خاصة في الطبقات الخارجية للثمرة (Slimestad et al., 2008; Rosa-Martínez et al., 2023).

أما من حيث السكريات القابلة للذوبان، فتتكون ثمار الطماطم أساساً من الجلوكوز والفركتوز اللذين يوجدان عادة بتركيز متقاربة ويسهمان بشكل كبير في تحديد الطعم الحلو للثمرة، في حين يعد حمض الستريك الحمض العضوي السائد في الطماطم، إلى جانب وجود أحماض عضوية أخرى بكميات أقل (Perveen et al., 2015). كما تحتوي الطماطم أيضاً على عدد من الفيتامينات والمعادن المهمة مثل فيتامين C والبوتاسيوم وحمض الفوليك، بالإضافة إلى مركبات الغليكوفلويدات ومن أهمها مركب ألفا-توماتين، الذي تتخفص تراكيزه تدريجياً مع تقدم مراحل نضج الثمرة (Salehi et al., 2019).



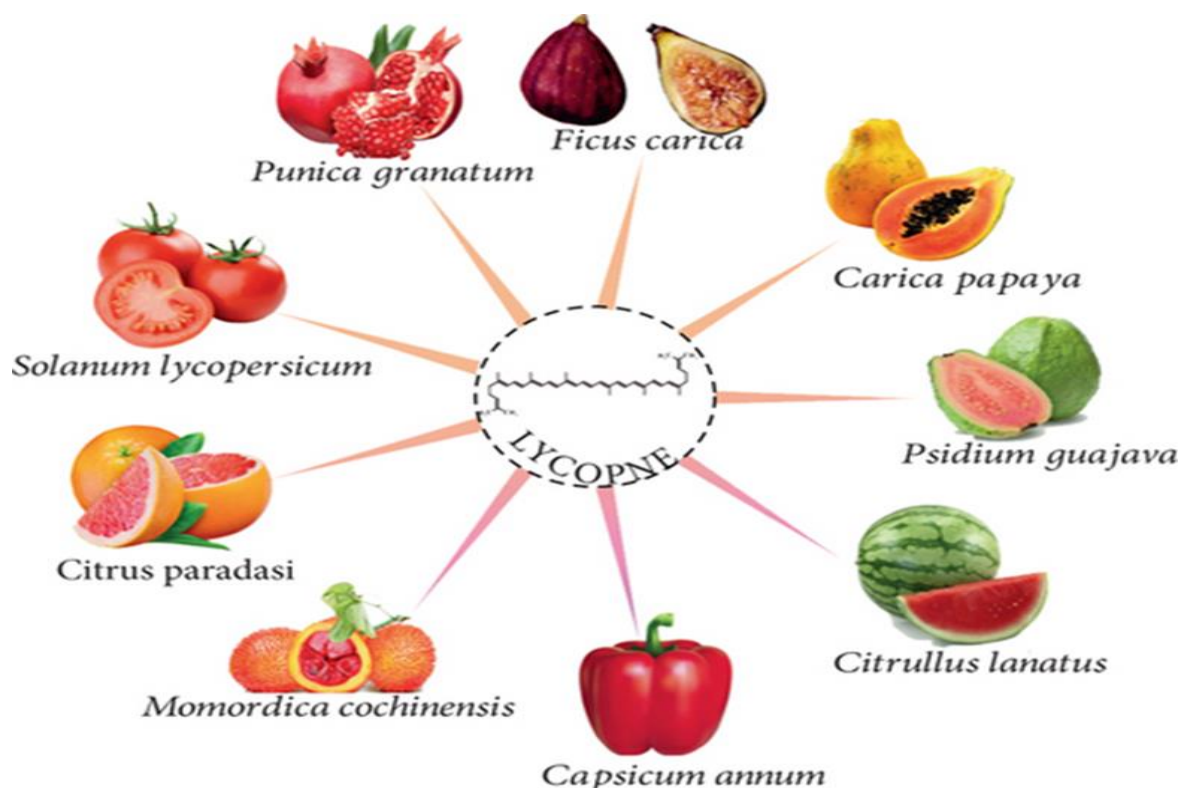
الوثيقة (11): البنى الكيميائية لبعض المركبات النشطة بيولوجيا في الطماطم (a): ألفا-كاروتين؛ (b) ليكوبين؛ (c) لوتين؛ (d) كانثازانثين؛ (e) بيتا-كاروتين؛ (f) حمض ريتينويك متقاطع كلياً؛ (g) ريتينول متقاطع كلياً؛ 9- (h) حمض ريتينويك مقرون؛ 13- (i) حمض ريتينويك مقرون؛ (j) نارينجينين؛ (k) كامفيرول؛ (l) ميريسيتين؛ (m) كيرسيتين؛ (n) ألفا-توماتين. (Chaudhary *et al.*, 2018)

3. بعض المركبات النشطة بيولوجيا في الطماطم

1.3 الليكوبين Lycopene:

1.1.3 تعريف الليكوبين:

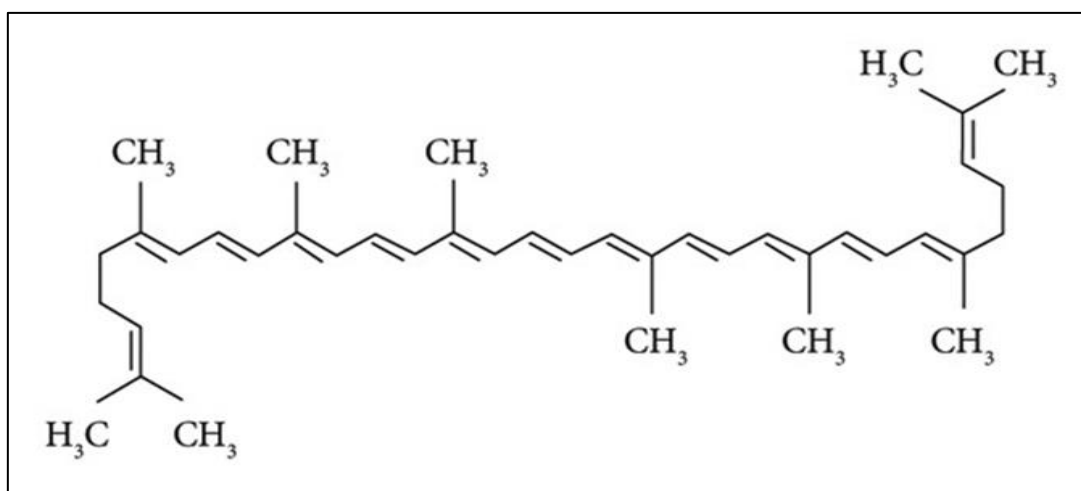
الليكوبين (Lycopene) هو صبغة كاروتينية (Carotenoid) طبيعية تنتمي إلى فصيلة التيربينات (Terpenoids)، وتحديدا إلى مجموعة الكاروتينات الهيدروكربونية الخالية من مجموعة بيتا-يونون (β -ionone) الحلقية. يتميز الليكوبين بلونه الأحمر الزاهي الذي يمنح العديد من الفواكه والخضروات ألوانها المميزة، وعلى رأسها الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) التي اشتق منها اسمه العلمي الأول إذ كان يعرف قديما بـ *Lycopersicum esculentum*. يصنف الليكوبين ضمن فئة الكاروتينات غير ذات المنشأ الفيتاميني (Non-provitamin A carotenoids) كونه لا يحول إلى فيتامين أ في الجسم (Rao & Agarwal, 2000; Clinton, 1998). من الناحية الكيميائية، هو عبارة عن هيدروكربون غير مشبع يتكون من سلسلة طويلة من الروابط المزدوجة المترافقة (Djouidi, 2016).



الوثيقة (12): بعض مصادر الليكوبين (Nami et al., 2021)

2.1.3 البنية الكيميائية للليكوبين:

الليكوبين مركب هيدروكربوني غير مشبع يتكون من 40 ذرة كربون ($C_{40}H_{56}$)، ويحتوي على سلسلة خطية طويلة من الروابط المزدوجة المترافقة (11 رابطة مزدوجة مترافقة و 2 غير مترافقة)، وهي المسؤولة عن نشاطه المضاد للأكسدة ولونه الأحمر المميز (Arballo *et al.*, 2021; Shafe *et al.*, 2024). كما يوجد في عدة أشكال أيزومرية، أهمها الشكل all-trans والأشكال cis، حيث تتميز الأشكال cis بامتصاص حيوي أعلى داخل جسم الإنسان (Shafe *et al.*, 2024).



الوثيقة (13): البنية الكيميائية للليكوبين (Shafe *et al.*, 2024)

3.1.3 الخصائص الفيزيوكيميائية للليكوبين:

تظهر الخصائص الفيزيائية والكيميائية للليكوبين في الجدول التالي:

الجدول (06): الخصائص الفيزيوكيميائية للليكوبين (Djoudi, 2016; Rao & Agarwal,

(2000; Stahl & Sies, 2005)

الصيغة الكيميائية	$C_{40}H_{56}$
الوزن الجزيئي	536.87 غ/مول
نقطة الانصهار	172-173 درجة مئوية
اللون	أحمر غامق
الذوبانية في الدهون والزيوت	عالية جدا
معامل الانكسار	1.544 (الشكل الصلب)
قيمة الامتصاص الضوئي (λ_{max})	470-505 نانومتر (في الهكسان)
الذوبانية في الماء	معدومة عمليا

4.1.3 مصادر الليكوبين:

يعد الليكوبين من المركبات الموجهة نباتيا حصرا (Phytochemical). لا يستطيع الإنسان والحيوان تصنيعه داخليا، بل يكتسبه عبر النظام الغذائي فقط. وفيما يلي جدول بأبرز المصادر الغذائية ومحتواها من الليكوبين:

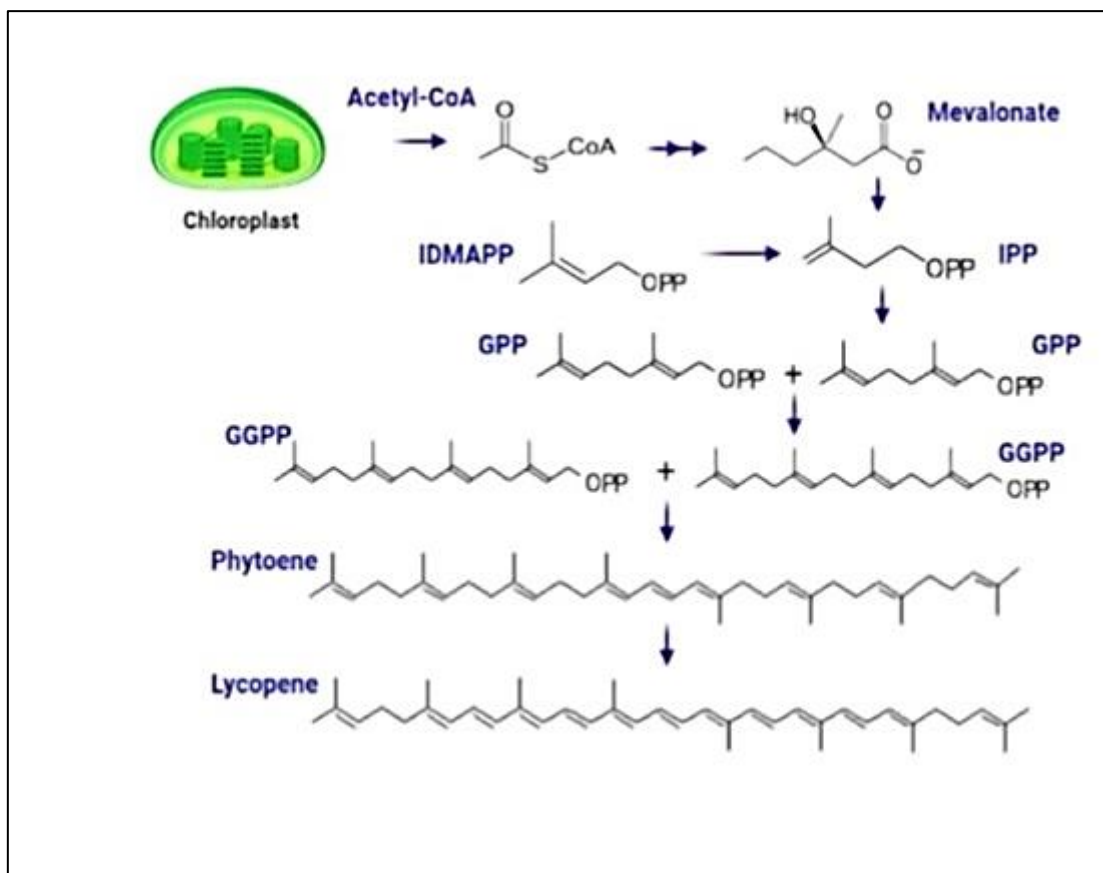
الجدول (07): محتوى الليكوبين في بعض الفواكه الطازجة (Shafe et al., 2024).

محتوى الليكوبين (ملغم/100 غرام)	الفاكهة
0.11–5.3	المشمش والطماطم الطازجة
0.65–0.78	الجزر
0.35–3.36	الجريب فروت الوردي
5.23–5.5	الجوافة الوردية
0.38–0.46	اليقطين
0.68–0.71	ثمر الورد
0.02–0.11	البطاطا الحلوة
2.30–7.20	البطيخ

5.1.3 التخليق الحيوي لليكوبين:

تعتبر عملية التخليق الحيوي لليكوبين في الأنسجة النباتية جزءا من مسار استقلابي معقد لإنتاج الكاروتينويدات. تبدأ هذه العملية من وحدات بنائية أساسية تسمى ثنائي فوسفات الإيزوبنتينيل (IPP)، وهي مركبات تحتوي على 5 ذرات كربون (Isoprène). من خلال سلسلة من تفاعلات التكثيف المتتالية، يتم دمج هذه الوحدات لإنتاج جزيء الفيتوين (Phytoène)، وهو أول كاروتينويد يتكون من 40 ذرة كربون ولكنه يمتاز بكونه عديم اللون.

تخضع جزيئات الفيتوين بعد ذلك لسلسلة من تفاعلات إزالة الهيدروجين (Désaturation)؛ حيث يتم في كل مرحلة إدخال روابط مزدوجة جديدة في الهيكل الكربوني. تمر هذه التحولات عبر مركبات وسيطة (مثل الفيتوفلوين وزيتا-كاروتين) حتى نصل إلى جزيء الليكوبين. ما يميز الليكوبين في نهاية هذا المسار هو امتلاكه لـ 11 رابطة مزدوجة مترافقة، وهو ما يفسر قدرته العالية على امتصاص الضوء عند أطوال موجية معينة، وبالتالي ظهور لونه الأحمر المميز مقارنة بالمركبات التي سبقتة في مسار التصنيع (Djoudi, 2016).



الوثيقة (14): مسار التخليق الحيوي لليكوبين (Tufail et al., 2024).

5.1.3 فوائد الليكوبين:

1.5.1.3 عند الإنسان:

● النشاط المضاد للأكسدة:

يملك الليكوبين قدرة فائقة على تحييد الجذور الحرة، حيث تبلغ قدرته على تحييد الأكسجين المفرد ضعف قدرة البيتا كاروتين وعشرة أضعاف قدرة ألفا توكوفيرول (Shafe et al., 2024).

● الوقاية من السرطان:

أظهر الليكوبين خصائص مضادة للسرطان، وخاصة سرطان البروستاتا، وسرطان الثدي، والرئة، والمعدة، من خلال تنظيم دورة الخلية وتحفيز الموت المبرمج للخلايا السرطانية (Nami et al., 2021).

● مكافحة الأمراض الأيضية:

يلعب دورا حيويا في تخفيف عوامل الخطر المرتبطة بالسمنة، ومرض السكري من النوع الثاني، وأمراض القلب والأوعية الدموية (Shafe et al., 2024).

• صحة القلب والأوعية الدموية:

يساعد في تقليل مستويات الكوليسترول الضار (LDL) ويمنع أكسدته، مما يقلل من خطر تصلب الشرايين (Nami et al., 2021).

• تأثيرات مضادة للالتهابات:

يعمل على تقليل السيتوكينات المسببة للالتهابات، مما يحمي الجسم من الأمراض المزمنة المرتبطة بالالتهاب (Shafe et al., 2024).

• حماية الأعصاب والعظام:

تشير الدراسات إلى أن الليكوبين يوفر حماية ضد الأمراض التنكسية العصبية ويحسن من كثافة العظام (Nami et al., 2021).

2.5.1.3 عند الطماطم:

• دور الليكوبين في إعطاء اللون الأحمر للثمرة:

يعد الليكوبين الصبغة الأساسية المسؤولة عن تلوين ثمار الطماطم، حيث يمثل ما بين 80-90% من إجمالي الكاروتينات في الثمرة الناضجة. تبدأ هذه العملية بتحول جذري في البلاستيدات، حيث تتحول البلاستيدات الخضراء (Chloroplasts) إلى كروموبلاستيدات (Chromoplasts) تتراكم فيها صبغة الليكوبين بكثافة. ويتراكم الليكوبين داخل بنى بروتينية دهنية متخصصة تعرف بـ (Lycopene crystals) تعمل على تثبيته وحمايته من التدهور، وتتوقف شدة اللون الأحمر على كثافة هذا التراكم وتوزيعه داخل أنسجة الثمرة (Vishnevetsky et al., 1999). من الناحية البيئية، يعمل هذا اللون كإشارة جذب للحيوانات والطيور التي تساهم في نشر البذور، كما يعمل كإشارة تحذيرية لبعض الحشرات الضارة (Schaefer & Schaefer, 2007).

• دور الليكوبين في حماية وتدعيم استجابة النبات:

يؤدي الليكوبين دوراً محورياً كدرع واق للنبات في مواجهة الإجهادات البيئية والحيوية؛ ففي حالات الإجهاد الضوئي والأشعة فوق البنفسجية (UV-B)، يعمل الليكوبين كمستقبل للطاقة الزائدة ومرشح طبيعي يمتص الإشعاع الضار، مما يمنع تلف الأغشية الخلوية والحمض النووي. كما يساهم في رفع كفاءة التحمل الحراري للنبات من خلال تثبيت الجذور الحرة، مما يحافظ على الاستقرار الخلوي للثمرة. وفي ظروف الجفاف، يقلل الليكوبين من مستويات الضرر التأكسدي للأغشية الخلوية (Lurie & Crisosto, 2005). أما في مواجهة مسببات الأمراض، فقد أظهرت الدراسات أن الطماطم الغنية بالليكوبين تبدي مقاومة أعلى للإصابات الفطرية مثل عفن Botrytis cinerea، بالإضافة إلى تعزيز الاستجابة الدفاعية ضد العدوى

البكتيرية والفيروسية عبر تفعيل مسارات الإشارة المناعية مثل حمض الجاسمونيك والساليسيليك (Mou et al., 2020).

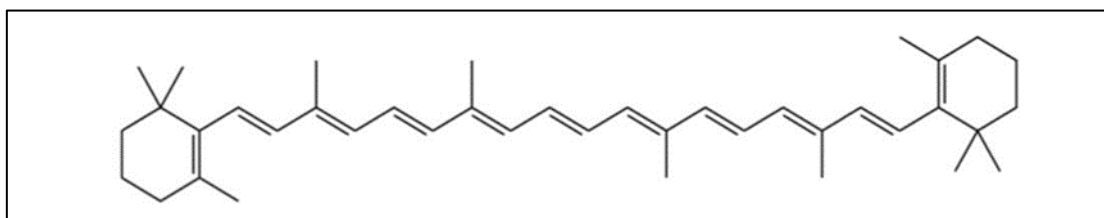
2.3 مركب البيتا-كاروتين:

1.2.3 تعريف بيتا-كاروتين:

بيتا-كاروتين هو عبارة عن مركب كاروتينويدي ينتمي إلى الكاروتينات غير المؤكسدة أي لا تحتوي على ذرات أكسجين في تركيبها الكيميائي ويعد من المركبات النباتية الثانوية التي تصنعها النباتات، ولا يستطيع جسم الإنسان إنتاجه؛ لذلك يتم الحصول عليه من المصادر الغذائية. ويعتبر طليعة لفيتامين A، إذ يحوله الجسم إلى الريتينول، وهو الشكل النشط الضروري لسلامة البصر والنمو. كما يمتلك بيتا-كاروتين خصائص مضادة للأكسدة تساهم في حماية الخلايا من الإجهاد التأكسدي (Bogacz-Radomska & Harasym, 2018).

2.2.3 البنية الكيميائية لبيتا-كاروتين:

يتميز بيتا-كاروتين بكونه مركبا تربينويديا (Terpenoid) ثنائي الحلقة ينتمي إلى الكاروتينات. يتكون جزيء بيتا-كاروتين من 40 ذرة كربون و56 ذرة هيدروجين ($C_{40}H_{56}$)، ويحتوي على سلسلة هيدروكربونية طويلة تضم روابط مزدوجة متناوبة ومترافقة ذات طبيعة غير قطبية، وهي المسؤولة عن صبغته الحمراء البرتقالية. وتنتهي هذه السلسلة بحلقتين متماثلتين من نوع بيتا-أيونون عند طرفي الجزيء، مما يجعله مركبا كارها للماء. ويمكن أن يؤدي انشطار الجزيء عند الموضع المركزي ($C_{15}-C_{15}'$) إلى تكوين جزئين من الريتينول (Tufail et al., 2024; Pavlova et al., 2018).



الوثيقة (15): هيكل بيتا-كاروتين الكيميائي (Samjlagić et al., 2021)

3.2.3 الخصائص الفيزيوكيميائية:

تعرض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لبيتا-كاروتين في الجدول أدناه

الجدول (08): الخصائص الفيزيائية والكيميائية لبيتا-كاروتين (Zhao et al., 2024).

الصيغة الكيميائية	$C_{40}H_{56}$
الوزن الجزيئي	536.87 غ/مول
اللون	برتقالي الى احمر
الكثافة	حوالي 0.9 – 1 غ/سم ³
درجة الانصهار	° 179 – 178 م
الذوبانية	غير قابل للذوبان في الميثانول والإيثانول، وقابل للذوبان في ثنائي كلورو الميثان والكلوروفورم وثنائي كبريتيد الكربون والبنزين والسيكلوهكسان، وقليل الذوبان في الإيثر وإيثر البترول والزيوت النباتية

4.2.3 المصادر الغذائية لبيتا-كاروتين:

يوجد البيتا-كاروتين في عدة مصادر غذائية نباتية، خاصة الخضروات والفواكه ذات الألوان الصفراء والبرتقالية والخضراء الداكنة. كما تتوفر كميات منه في بعض التوابل والأعشاب مثل الكركم والفلفل الأحمر والحلبة. وتختلف نسبة بيتا-كاروتين حسب نوع النبات ودرجة النضج والظروف البيئية. وتعد الخضروات مثل الجزر والسبانخ والطماطم والفلفل الأخضر من أهم المصادر الغنية به، بينما تحتوي بعض الفواكه على كميات أقل. ويبين الجدول التالي محتوى بيتا-كاروتين في بعض المصادر الغذائية الشائعة (Tufail et al., 2024).

الجدول (09): محتوى بعض المصادر الغذائية من بيتا-كاروتين (Tufail et al., 2024)

المحتوى	المصدر
11,210 ميكروغرام/100 غ	الجزر
3500 ميكروغرام/100 غ	الطماطم
9940 ميكروغرام/100 غ	السبانخ
3220 ميكروغرام/100 غ	البامية
2100 ميكروغرام/100 غ	الباذنجان
1750 ميكروغرام/100 غ	الفلفل الأخضر الحار

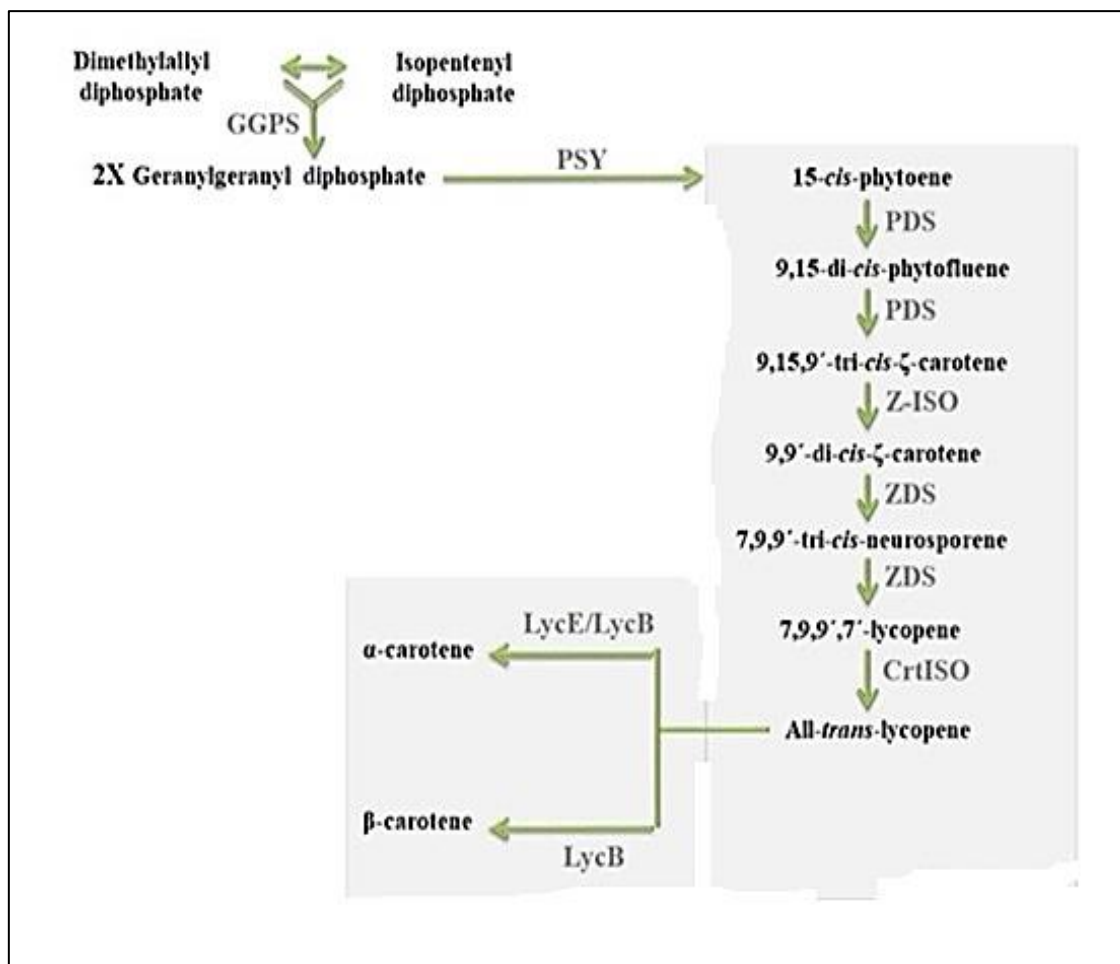
الفراولة	8,5 ميكروغرام/100 غ
الفاصولياء الخضراء	0,23 ميكروغرام/100 غ
العنب	6,6 ميكروغرام/100 غ

5.2.3 التخليق الحيوي لببتا-كاروتين:

يتم التخليق الحيوي لببتا-كاروتين في النباتات داخل البلاستيدات (الخضراء أو الملونة) عبر مسار الكاروتينات، حيث يبدأ من مركبات إيزوبرينويدية أساسية. في البداية يتكاثف كل من ثنائي فوسفات إيزوبنتنيل (IPP) وثنائي فوسفات ثنائي ميثيل الأليل (DMAPP) بواسطة إنزيم جيرانييل-جيرانييل ثنائي الفوسفات سينثاز (GGPS) لتكوين جيرانييل-جيرانييل ثنائي الفوسفات (GGPP)، وهو المركب الطبيعي لتخليق الكاروتينات (Liang & Jiang, 2017).

يحدث تكاثف جزئيتين من جيرانييل جيرانييل ثنائي الفوسفات (GGPP) بواسطة إنزيم فيتوين سينثاز (PSY)، مما يؤدي إلى تكوين مركب cis-phytoene15-، الذي يعد أول كاروتينويد عديم اللون في هذا المسار الحيوي. بعد ذلك، يخضع الفيتوين لسلسلة من تفاعلات نزع الهيدروجين بواسطة إنزيم فيتوين ديساتوراز (PDS)، منتجاً عدداً من المركبات الوسيطة، من بينها phytofluene ومركب γ -carotene. ثم تتعرض هذه المركبات لتفاعلات إيزومرة بواسطة إنزيم Z-ISO، تليها مرحلة إضافية من نزع الهيدروجين بواسطة إنزيم ZDS (Z-carotene desaturase) مما يؤدي إلى تكوين مركب neurosporene (Torres-Montilla & Rodriguez-Concepcion, 2021).

بعد ذلك تتحول المركبات الوسيطة إلى الليكوبين بواسطة إنزيم كاروتينويد إيزوميراز (CrtISO)، حيث ينتج عن هذه العملية تكوين all-trans-lycopene، وهو كاروتينويد خطي يتميز بامتلاكه عدداً كبيراً من الروابط المزدوجة المترافقة التي تمنحه خصائص لونية مميزة وتجعله ذا قدرة عالية على التقاط الجذور الحرة. وفي المرحلة النهائية من هذا المسار الحيوي يخضع الليكوبين لتفاعل حلقة عند طرفي الجزيء بواسطة إنزيم لايكوبين بيتا-سيكلاز (LycB)، مما يؤدي إلى تكوين بيتا-كاروتين (β -carotene)، الذي يتميز بوجود حلقتي β -ionone عند نهايتي الجزيء (Sathasivam & Ki, 2018).



الوثيقة (16): مسار التخليق الحيوي لبىتا-كاروتين (Almagro et al., 2022)

6.2.3 فوائد البىتا-كاروتين:

1.6.2.3 فوائده للإنسان:

• الوقاية من السرطان:

يعتبر بىتا-كاروتين من الكاروتينات التي تظهر خصائص مضادة للسرطان في أنسجة الثدي، حيث يساهم في تعزيز نشاط إنزيمات إزالة السموم، وتعديل الاستجابات المناعية، وتنشيط تكاثر الخلايا غير المنضبط، إضافة إلى تقليل الإجهاد التأكسدي وتنظيم مسارات الإشارات الخلوية الرئيسية. كما يساهم بىتا-كاروتين، بفضل نشاطه المضاد للأكسدة، في تنشيط تكاثر الخلايا السرطانية والحد من تكوين الأوعية الدموية والالتهاب، مع تعزيز موت الخلايا المبرمج ودعم وظيفة الجهاز المناعي، مما يعكس تأثيره الوقائي المحتمل ضد تطور السرطان (Ibrahim et al., 2026).

• حماية القلب والأوعية الدموية:

يساهم بيتا-كاروتين في الحد من تطور أمراض القلب والأوعية الدموية من خلال تقليل الإجهاد التأكسدي وتنشيط إنتاج الجذور الحرة. كما يساهم في تحسين الإتاحة الحيوية لأكسيد النيتريك وتقليل الالتهاب الوعائي، مما يدعم وظائف الأوعية الدموية ويحد من تطور الاضطرابات القلبية الوعائية (Ibrahim et al., 2026).

• تقليل دهون الجسم:

يساعد بيتا-كاروتين في تنظيم الدهون من خلال نشاطه في الخلايا الدهنية، حيث يحافظ على التوازن التأكسدي، ويزيد من إنتاج العوامل المضادة للالتهاب، وينظم أيض الدهون في هذه الخلايا. كما يعيق نضج الخلايا الدهنية ويقلل من تكونها، ويمكن أن يؤثر في مراحل مختلفة من دورة حياة الخلايا الدهنية وينشط تمايزها. وتشير الدراسات إلى أن الكاروتينات قد تؤثر في تراكم الدهون وأيضها في الجسم (Tufail et al., 2024).

• الوقاية من اضطرابات الجلد:

يساهم بيتا-كاروتين في تحسين صحة الجلد ومظهره، كما يساعد في التخفيف من أعراض الالتهاب، ويعزز ترطيب الجلد وزيادة سماكته من خلال دعم دفاعات الجسم المضادة للأكسدة. إضافة إلى ذلك، يعمل على تنعيم الخطوط الدقيقة وإبطاء عملية الشيخوخة، ويساهم في حماية الجلد من الأضرار الناتجة عن الأشعة فوق البنفسجية. كما يؤدي بيتا-كاروتين إلى تثبيط الإنزيمات الالتهابية ومنع أكسدة دهون الجلد، مما يجعله عاملاً فعالاً في الوقاية من اضطرابات الحساسية الضوئية والأورام الجلدية الخبيثة (Ibrahim et al., 2026).

2.6.2.3 بالنسبة للنبات:

• مقاومة الإجهاد التأكسدي:

يعد بيتا-كاروتين من المركبات التي تعمل كمضاد للأكسدة في النظام الضوئي الثاني (PSII). فعند تعرض النبات لظروف بيئية مجهددة تتكون أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، خاصة الأكسجين الأحادي (O_2^1)، على مستوى مركز التفاعل. في هذه الحالة يتفاعل بيتا-كاروتين مع هذا الأكسجين النشط، مما يساهم في تقليل تراكم أنواع الأكسجين التفاعلية والحد من حدوث الإجهاد التأكسدي، وبالتالي حماية النظام الضوئي الثاني (D'Alessandro & Havaux, 2019).

• تنظيم نمو الجذور:

يعتبر β -cyclocitral من المركبات المشتقة من بيتا-كاروتين، حيث يعمل على تحفيز تفرع الجذور الجانبية ويعزز انقسام الخلايا في الميرستيمات الجذرية، مما يؤدي إلى زيادة نمو الجذور. كما لوحظ أن لهذا

المركب تأثيرا في زيادة نمو الجذور في نبات الطماطم، حيث يساهم في تنظيم تطور النظام الجذري (Dickinson *et al.*, 2019).

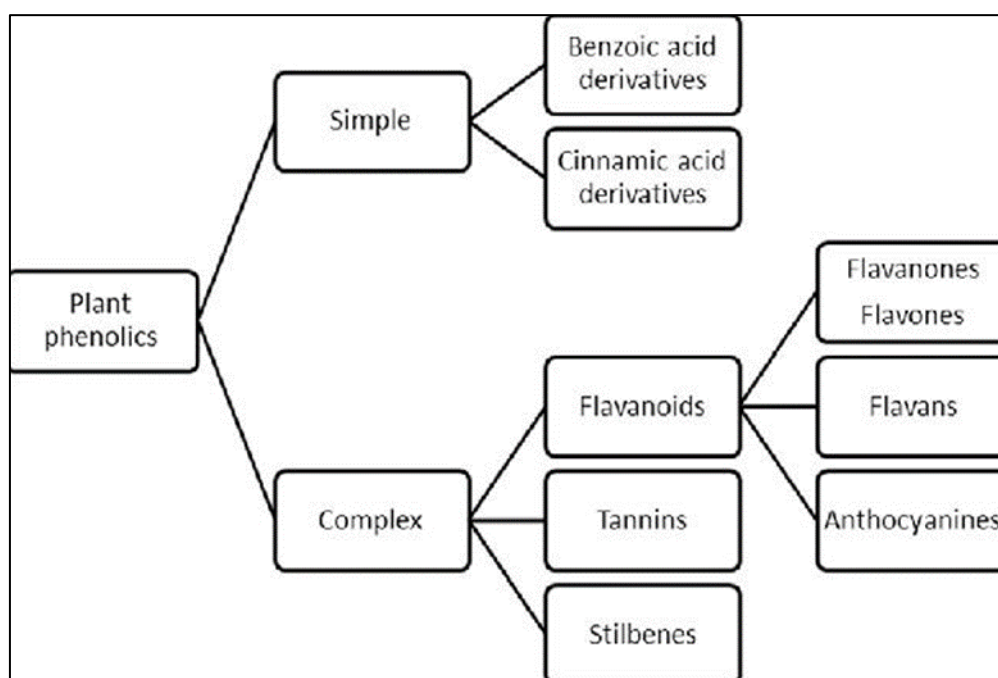
3.6.2.3 بالنسبة لثمار الطماطم:

يساهم بيتا-كاروتين في تحسين جودة ثمار الطماطم، حيث يؤدي الى زيادة محتوى حمض الأبسيسيك، وتأخر تلين الثمار وإطالة مدة بقائها بعد الحصاد، كما ينتج عنه حدوث تغيرات في جدار الخلايا وزيادة سماكة الكيوتكل (Diretto *et al.*, 2020).

3.3 المركبات الفينولية (Phenolic Compounds):

1.3.3 تعريف المركبات الفينولية:

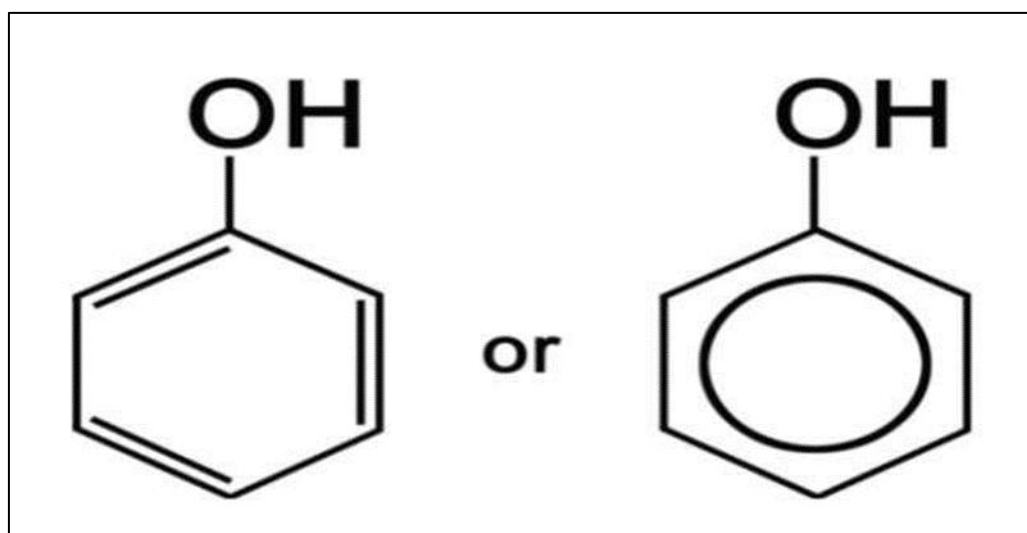
تعد المركبات الفينولية من اكثر مجموعات المستقلبات الثانوية انتشارا في المملكة النباتية (Bhattacharya *et al.*, 2010)، إذ يعرف حاليا أكثر من 8000 بنية فينول، وهي مركبات تحتوي على حلقة عطرية واحدة أو أكثر، مع مجموعة هيدروكسيل واحدة أو أكثر (Dai & Mumper, 2010). وتلعب هذه المركبات أدوارا حيوية في النبات تشمل النمو الطبيعي، والتطور، والدفاع ضد العوامل الخارجية مثل الأشعة فوق البنفسجية والمسببات المرضية. تصنف هذه المركبات بناء على تعقيد تركيبها الجزيئي ووزنها الجزيئي إلى مجموعتين رئيسيتين تضم الفينولات البسيطة والفينولات المعقدة (Bachir Raho & Benali, 2021).



الوثيقة (17): تصنيف المركبات الفينولية (Anantharaju *et al.*, 2016).

2.3.3 البنية الكيميائية للمركبات الفينولية:

تقوم البنية الكيميائية الأساسية للمركبات الفينولية على حلقة بنزينية (Benzene Ring / C₆) مرتبطة بمجموعة هيدروكسيل واحدة على الأقل. ويمثل الفينول (Phenol, C₆H₅OH) أبسط صور هذه المركبات، غير أن المركبات الفينولية الطبيعية أشد تعقيدا وتتفاوت تفاوتاً كبيراً في درجة التعقيد الهيكلي وتصنف المركبات الفينولية هيكلياً وفق عدد ذرات الكربون ودرجة الترابط في الهيكل الأساسي (Harborne & Williams, 2000).



الوثيقة (18): البنية الكيميائية لحلقة الفينول (Elayyat, 2015).

3.3.3 الخصائص الفيزيوكيميائية للمركبات الفينولية:

نظراً لتنوع المركبات الفينولية الموجودة في ثمرة الطماطم (*Solanum lycopersicum* L) وتباين خصائصها الفيزيوكيميائية من مركب لآخر، يُقدم الجدول التالي أبرز هذه المركبات متضمناً الصيغة الكيميائية والوزن الجزيئي واللون ودرجة الانصهار والذوبانية:

الجدول (10): الخصائص الفيزيوكيميائية لبعض المركبات الفينولية (Crozier et al., 2009; Nacz & Shahidi, 2006).

المركب	الصيغة	الوزن الجزيئي MW (g/mol)	اللون	درجة الانصهار	الذوبانية

قابل للذوبان في الماء والإيثانول؛ ضعيف في المذيبات غير القطبية	208 °C	أبيض - أصفر فاتح	354.3	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	حمض الكلوروجينيك (Chlorogenic Acid)
قابل للذوبان في الإيثانول والماء الساخن؛ ضعيف في الماء البارد	211–213 °C	أصفر فاتح إلى برتقالي	180.2	C ₉ H ₈ O ₄	حمض الكافيك (Caffeic Acid)
قابل للذوبان في الإيثانول والأسيتون؛ ضعيف جداً في الماء	316–317 °C	أصفر - أصفر مخضر	302.2	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	الكيرسيتين (Quercetin)
قابل للذوبان في الإيثانول والميثانول؛ شحيح في الماء	251 °C	أبيض - أصفر شاحب	272.3	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	النارينجينين (Naringenin)
قليل الذوبان في الماء البارد؛ يذوب في الماء الساخن والإيثانول	214–215 °C	أصفر - أصفر مخضر	610.5	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	الروتين (Rutin)

4.3.3. مصادر المركبات الفينولية:

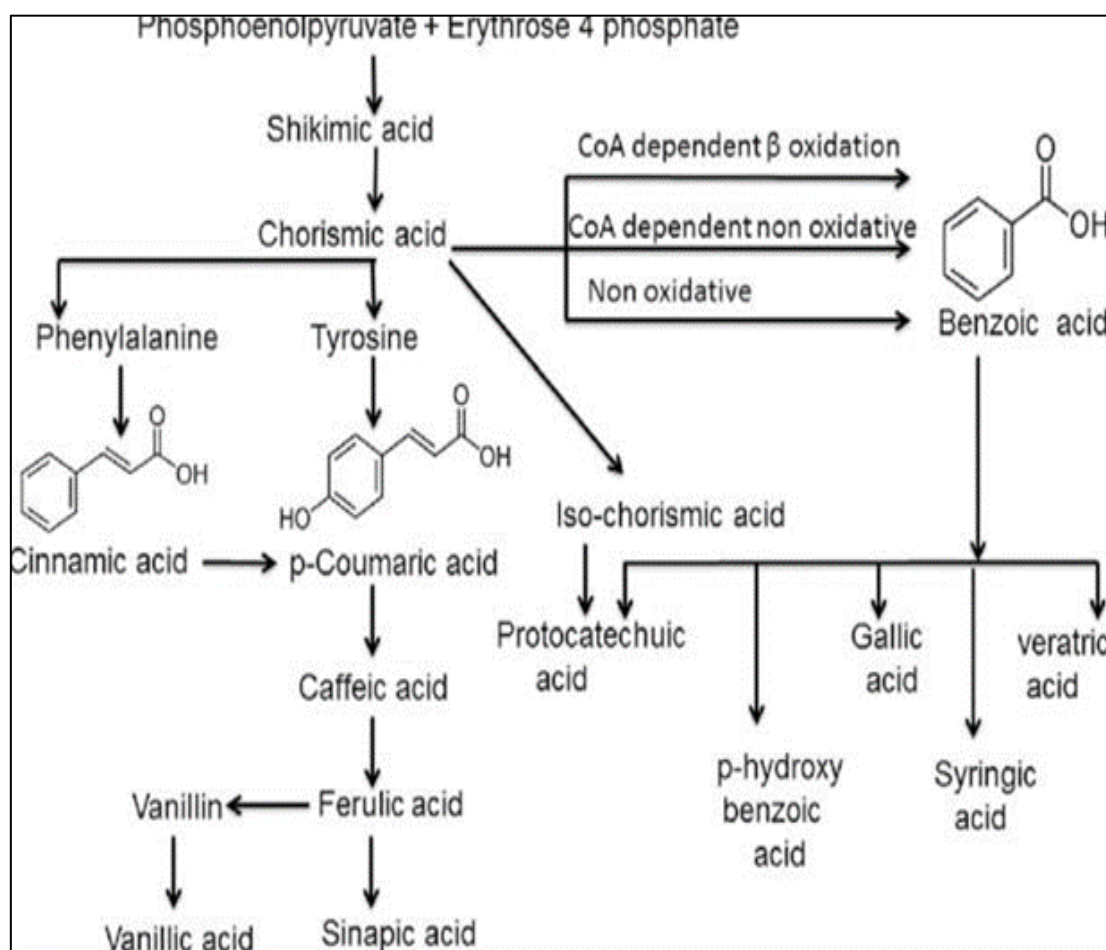
تعد المركبات الفينولية من أهم المركبات الثانوية في النباتات، وتوجد في معظم الأنسجة النباتية مثل الأوراق، الثمار، البذور، القشور، الجذور والأزهار. وتنتشر هذه المركبات في العديد من المجموعات النباتية خاصة في الفواكه والخضروات والحبوب والبقوليات والمشروبات النباتية مثل الشاي والقهوة والكاكاو. كما تعتبر النباتات المصدر الرئيسي للمركبات الفينولية في الطبيعة، حيث يتم تصنيعها كجزء من آليات الدفاع ضد الإجهادات البيئية مثل الجفاف والملوحة والأشعة فوق البنفسجية والإصابات الميكروبية. وتشمل أهم مصادر الفينولات الفواكه مثل التفاح والعنب والطماطم، والخضروات مثل البصل والبروكلي، والحبوب الكاملة، والبقوليات، وكذلك الأعشاب الطبية والنباتات العطرية. وتختلف كمية وأنواع المركبات الفينولية حسب النوع النباتي ومرحلة النمو والظروف البيئية (Kumar & Goel, 2019; Ignat *et al.*, 2011).



الوثيقة (19): أفضل مصادر المركبات الفينولية (Seifu *et al.*, 2012).

5.3.3. تخليق المركبات الفينولية:

يتم تخليق المركبات الفينولية في النباتات أساسا عبر مسار حمض الشيكيمييك (Shikimic acid pathway) ومسار الفينيل بروبانويد (Phenylpropanoid pathway)، حيث يبدأ التخليق من الحمض الأميني فينيل ألانين الذي يتحول بواسطة إنزيم Phenylalanine ammonia lyase (PAL) إلى حمض السيناميك، والذي يعد المركب الأساسي لتكوين مختلف الفينولات مثل الفلافونويدات والأحماض الفينولية والليغنين. وتلعب هذه المركبات دورا مهما في حماية النبات من الإجهادات البيئية، كما تشارك في تكوين جدران الخلايا والمواد الدفاعية ضد مسببات الأمراض (Dai & Mumper, 2010; Kumar & Goel, 2019).



الوثيقة (20): مسارات تخليق المركبات الفينولية (Anantharaju et al., 2016).

6.3.3 فوائد المركبات الفينولية:

1.6.3.3 للإنسان:

• الدور كمضادات للأكسدة

تعد المركبات الفينولية من أقوى مضادات الأكسدة الطبيعية، حيث تعمل على تثبيط الجذور الحرة وتقليل الإجهاد التأكسدي الذي يسبب تلف الخلايا والحمض النووي والبروتينات، مما يساهم في الوقاية من العديد من الأمراض المزمنة (Dai & Mumper, 2010).

• الدور المضاد للسرطان

أظهرت العديد من الدراسات أن المركبات الفينولية تمتلك نشاطا مضادا للسرطان، حيث تعمل على تثبيط نمو الخلايا السرطانية، وتحفيز موت الخلايا المبرمج (Apoptosis)، ومنع تكوين الأوعية الدموية المغذية للأورام. كما تساهم في تقليل تلف الحمض النووي الناتج عن الجذور الحرة (Cory et al., 2018).

• الحماية من الأشعة فوق البنفسجية

تلعب المركبات الفينولية دورا مهما في حماية الخلايا من الأضرار الناتجة عن الأشعة فوق البنفسجية، حيث تمتص هذه المركبات الأشعة فوق البنفسجية وتمنع تكوين الجذور الحرة، مما يقلل من تلف الجلد والحمض النووي. كما تستخدم بعض الفينولات في الصناعات الدوائية ومستحضرات التجميل كمواد واقية من الأشعة فوق البنفسجية (Kumar & Goel, 2019).

• الوقاية من أمراض القلب والأوعية الدموية

تساعد المركبات الفينولية في تقليل أكسدة الكوليسترول الضار (LDL)، وتحسين وظيفة الأوعية الدموية، وتقليل الالتهابات، مما يقلل من خطر الإصابة بتصلب الشرايين وأمراض القلب (Cory et al., 2018).

• الدور المضاد للالتهابات

تمتلك المركبات الفينولية خصائص مضادة للالتهابات، حيث تعمل على تثبيط الإنزيمات والمواد المسؤولة عن الالتهاب، مما يساعد في تقليل الأمراض الالتهابية المزمنة (Dai & Mumper, 2010).

2.6.3.3 للنبات:

• الدفاع ضد الكائنات الممرضة

تلعب المركبات الفينولية دورا مهما في حماية النبات من البكتيريا والفطريات والفيروسات، حيث تعمل على تثبيط نمو الكائنات الممرضة، كما تدخل في تكوين مركبات سامة أو مثبطة لنمو الممرضات.

بالإضافة إلى ذلك، تساهم بعض المركبات الفينولية في تكوين اللجنين الذي يقوي جدار الخلية ويمنع اختراق مسببات الأمراض للأنسجة النباتية (Bhattacharya *et al.*, 2010).

● مقاومة الحشرات

تعمل المركبات الفينولية كمواد طاردة أو سامة للحشرات، كما تقلل من قدرة الحشرات على هضم البروتينات النباتية، مما يقلل من تغذيتها ونموها. ولذلك تعتبر الفينولات جزءاً مهماً من نظام الدفاع الكيميائي للنباتات ضد الحشرات (Kumar & Goel, 2019).

● مقاومة الإجهادات اللاحيائية

الإجهاد المائي (الجفاف)

عند تعرض النبات للجفاف، يزداد إنتاج المركبات الفينولية التي تعمل كمضادات أكسدة لحماية الخلايا من الأضرار الناتجة عن الإجهاد التأكسدي.

الإجهاد الملحي

تساعد المركبات الفينولية في تقليل الأضرار الناتجة عن الملوحة من خلال تقليل تكوين الجذور الحرة وحماية الأغشية الخلوية.

درجات الحرارة المرتفعة

تعمل المركبات الفينولية على حماية البروتينات والإنزيمات من التلف الناتج عن الحرارة المرتفعة.

الأشعة فوق البنفسجية

تمتص المركبات الفينولية الأشعة فوق البنفسجية وتمنع تلف الحمض النووي والخلايا النباتية، لذلك تتراكم هذه المركبات في الأوراق المعرضة للضوء (Kumar & Goel, 2019; Dai & Mumper, 2010).

3.6.3.3 نبات الطماطم:

تحتوي الطماطم على العديد من المركبات الفينولية مثل حمض الكلوروجينيك، حمض الكافيك، حمض الفيروليك، والروتين والكيرسيتين، وتساهم هذه المركبات في النشاط المضاد للأكسدة، وحماية النبات من الإجهادات البيئية والأمراض، كما تزيد من القيمة الغذائية للطماطم. كما أن استهلاك الطماطم الغنية بالمركبات الفينولية يرتبط بتقليل خطر الإصابة بأمراض القلب وبعض أنواع السرطان، ويرجع ذلك إلى نشاطها المضاد للأكسدة والالتهابات (Martí *et al.*, 2016).

4.3 الكربوهيدرات:

1.4.3 تعريف الكربوهيدرات:

تعد الكربوهيدرات من المكونات الرئيسية للنباتات، حيث يتم تكوينها من خلال نشاط التمثيل الضوئي (Photosyntheses)، وهي تمثل النسبة الأكبر من المركبات العضوية في عالم النبات. وتعرف بأنها جزيئات حيوية أساسية تعمل كمصدر رئيسي للطاقة وعناصر هيكلية تدخل في بناء جدران الخلايا النباتية. كما تصنف الكربوهيدرات النباتية عموماً إلى ثلاث مجموعات رئيسية: السكريات الأحادية، السكريات قليلة التعدد، والسكريات المتعددة (Chandel, 2021; Tharanathan *et al.*, 1987).

2.4.3 البنية الكيميائية للكربوهيدرات:

تعتمد البنية الكيميائية للكربوهيدرات على وحدات أساسية تسمى السكريات الأحادية، والتي ترتبط ببعضها عبر روابط غليكوسيدية (Glycosidic linkages) لتكوين سلاسل بسيطة أو معقدة (Chandel, 2021). وتتميز السكريات المتعددة في النباتات بتنوع هيكلي كبير ناتج عن إمكانية التفرع عند مجموعات هيدروكسيل مختلفة، وتوافر أشكال أنوميرية متنوعة (Alpha/Beta)، مما يسمح بتكوين جزيئات ذات وظائف ميكانيكية أو تخزينية متباينة (Tharanathan *et al.*, 1987).

3.4.3 مصادر الكربوهيدرات:

تتوزع الكربوهيدرات النباتية في مجموعة واسعة من المصادر الغذائية والطبيعية:

● الحبوب والبقوليات:

يعد القمح والأرز والذرة والشعير مصادر غنية بالنشاء (يشكل 65-85% من وزنها الجاف). تحتوي بذور البقوليات كذلك على نسب معتبرة من النشاء والألياف والرافينوز (Hoover, 2021).

● الدرنات والجذور:

تمثل البطاطس والبطاطا الحلوة والكسافا مصادر نشوية رئيسية. يحتوي جذر الشمندر السكري على نسبة سكروز تصل إلى 16-18% من وزنه الطازج (BeMiller & Huber, 2018).

● الفواكه والخضروات:

تشتمل على سكريات أحادية وثنائية (غلوكوز، فركتوز، سكروز) بنسب تتراوح حسب نضج الثمرة، إضافة إلى ألياف غذائية كالبكتين والسيليلوز التي تساهم في تحسين ملمس الغذائي (Giovannoni *et al.*, 2017).

● الطماطم (*Solanum lycopersicum*):

تحتوي ثمرة الطماطم الناضجة على 2.5-5% من الكربوهيدرات الكلية، يتوزع معظمها بين الجلوكوز والفركتوز كسكريات أحادية حرّة، ويمثل السكروز نسبة ضئيلة في الثمار الناضجة مقارنة بالمرحلة الخضراء (Génard *et al.*, 2010).

4.4.3 تخليق الكربوهيدرات:

1.4.4.3 التمثيل الضوئي ودورة كالفن:

يبدأ تخليق الكربوهيدرات في النبات بعملية التمثيل الضوئي (Photosynthesis) التي تجري في البلاستيدات الخضراء (Chloroplasts). تقسم المرحلة الكيميائية إلى دورة كالفن-بنسون (Calvin-Benson Cycle) في سدى البلاستيدة، إذ يثبت CO_2 بفعل إنزيم RuBisCO على مستقبل الريبولوز-1,5-ثنائي الفوسفات (RuBP) لينتج في نهاية المطاف ثلاثو-فوسفات الغليسيرات (G3P) الذي يعد اللبنة الأولى في بناء السكريات (Taiz *et al.*, 2015).

2.4.4.3 تخليق السكروز والنشاء:

يصنع السكروز في السيتوسول بفعل إنزيمي سكروز-فوسفات-سينثاز (SPS) وسكروز-فوسفات-فوسفاتاز (SPP) وفق التسلسل: $UDP-Glucose + Fructose-6-P \rightarrow Sucrose-6-P \rightarrow Sucrose$. ينقل السكروز بعد ذلك عبر القناة اللحائية إلى الأعضاء المستهلكة (أجهزة الحوض) (Buchanan *et al.*, 2015). أما النشاء فيصنع داخل البلاستيدة بفعل إنزيم ADP-غلوكوز-بيروفوسفوريلاز (AGPase) وبوليمراز النشاء (Starch Synthase) الذي يضيف وحدات غلوكوز إلى السلسلة المتنامية من جهة النهاية غير المختزلة (Preiss, 2020).

3.4.4.3 تخليق السيليلوز:

يصنع السيليلوز على غشاء البلازما مباشرة بفعل معقدات سيليلوز-سينثاز (CESA complexes) التي ترسم بواسطة الأنابيبات الدقيقة القشرية (Cortical microtubules). كل معقد روزتي (Rosette complex) يضم 18 وحدة بروتينية CESA تعمل معا لبلورة السيليلوز وتحريره إلى الجدار الخلوي (Cosgrove, 2022).

5.4.3 فوائد الكربوهيدرات:

1.5.4.3 فوائدها للإنسان:

● وقود حيوي:

تعد الكربوهيدرات مصدرا أساسيا للطاقة للجسم، خاصة أثناء ممارسة الرياضة أو المجهود البدني الشاق (Chandel, 2021).

• الألياف الغذائية:

لها أهمية غذائية كبيرة في تحسين وظائف الجهاز الهضمي (Chandel, 2021).

• الاستخدامات الصناعية والطبية:

تستخدم الكربوهيدرات مثل السليلوز في صناعة الورق والألياف، بينما تستخدم البكتينيات والألجينات في الصناعات الغذائية كعوامل استحلاب وتساهم السكريات الحرة في تطوير النكهات المميزة أثناء معالجة الأطعمة (Tharanathan *et al.*, 1987).

2.5.4.3 فوائد للنبات:

• مصدر للطاقة:

توفر الطاقة اللازمة للنمو والتكاثر والعمليات الحيوية والتمثيل الغذائي.

• الدعم الهيكلي:

يمنح السليلوز جدران الخلايا النباتية الصلابة والدعم الهيكلي اللازم (Khornti, 2023).

• مواجهة الإجهاد البيئي:

تساعد الكربوهيدرات النباتات على تحمل الإجهادات الحيوية وغير الحيوية (مثل الجفاف والملوحة والحرارة) من خلال تنظيم الضغط الأسموزي وحماية الخلايا من التلف (Nawaz *et al.*, 2025).

• التواصل والمناعة:

تعمل بعض الكربوهيدرات كجزيئات إشارة (Signaling molecules) تشبه الهرمونات، وتلعب دوراً محورياً في تحفيز جهاز المناعة النباتي ضد الميكروبات (Trouvelot *et al.*, 2014).

3.5.4.3 فوائد للطماطم:

تلعب الكربوهيدرات دوراً بنوياً ودفاعياً محورياً داخل الثمرة؛ إذ تدخل السكريات في تركيب مركبات "الجليكوليبيدات" (Glycoalkaloids) مثل مركب "التوماتين" (Tomatine)، الذي يعمل كخط دفاع طبيعي يحمي الطماطم من الهجمات الميكروبية الناتجة عن البكتيريا، والفيروسات، والفطريات. كما تؤثر هذه المكونات الكربوهيدراتية بشكل مباشر على جودة الثمار وخصائصها الحسية؛ فبينما يمنح المحتوى العالي من التوماتين في الثمار الخضراء مذاقاً مرا يحميها من الاستهلاك قبل نضوج بذورها، تساهم التغيرات في

مستويات السكريات والألياف في تحسين مذاق الثمرة الناضجة ومدة صلاحيتها التسويقية (Chaudhary *et al.*, 2018).

الجزء التطبيقي

الفصل الأول: المواد والطرق

تمهيد:

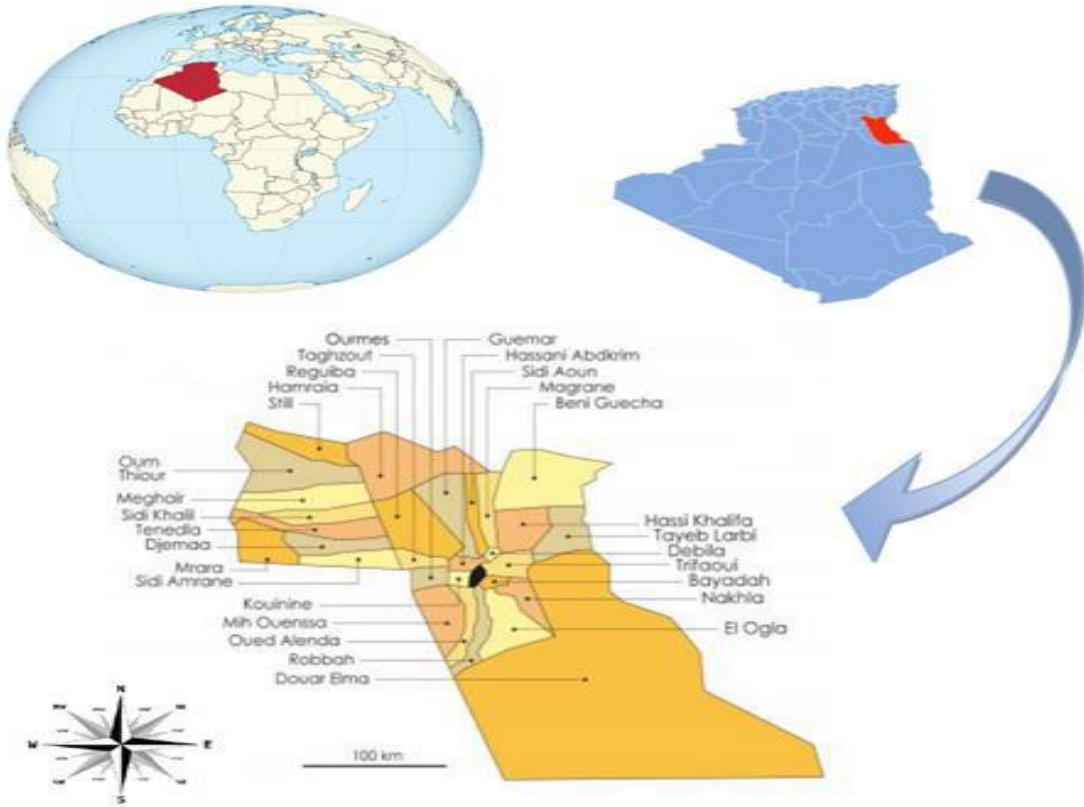
تهدف هذه الدراسة لمتابعة التغيرات الفيزيولوجية والتحوليات البيوكيميائية التي ترافق عملية نضج ثمار نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.)، لصنف "امتياز"، تحت الظروف البيئية والمناخية لولاية الوادي. وتهدف التجربة بشكل أساسي إلى التتبع الكمي والنوعي للتغيرات الحاصلة في الأيض الثانوي والأساسي للثمرة عبر مراحل نضجها المختلفة (المرحلة الخضراء، مرحلة التلون، ومرحلة الحمراء). وتركز الدراسة على التخليق الحيوي للمركبات الحيوية النشطة وكذلك التغيرات في المؤشرات الفيزيائية والتكنولوجية المرتبطة بالجودة والتسويق. كما تحاول الدراسة المساهمة في التعرف على التغيرات الفيزيولوجية والتغيرات في الثمار الفرازية (Climacteric fruits) وتأثير مساراتها البيوكيميائية.

1. منطقة الدراسة:

1.1 منطقة الدراسة والموقع الجغرافي:

تقع ولاية الوادي في الجزء الجنوبي الشرقي من الجزائر، وتعتبر من الحواضر الواحاتية الأساسية في البيئة الصحراوية. من الناحية الإدارية والجغرافية المحينة، يحد الولاية من الجهة الشمالية ولايتا خنشلة وتبسة، ومن الجهة الغربية ولايتا المغير وتقرت، في حين تشترك من الناحية الشرقية في حدود برية دولية مع الجمهورية التونسية يبلغ طولها حوالي 260 كيلومترا، وتغطي المساحة الإجمالية الحالية للولاية ما يقارب 35,752 كيلومترا مربعا (Mokhnane et al., 2023) وتتميز الولاية بتنوع أقاليمها الجغرافية الحيوية، حيث يبرز إقليم "وادي سوف" في الوسط كمركز ثقل زراعي واحاتي، يليه إقليم المنطقة الحدودية في الجهة الشرقية (جابر، 2015).

يمثل إقليم وادي سوف حوضاً هيدرولوجياً وجغرافياً فريداً يقع على الحواف الشمالية للعرق الشرقي الكبير. يمتد الإقليم فلكياً بين خطي عرض 33° و 34° شمالاً، وبين خطي طول 6° و 8° شرقاً، مستحوذاً على مساحة جغرافية ترابية تقدر بحوالي 350,000 هكتار. (Saibi et al., 2009) وتكتسي المنطقة خصوصية بيئية استثنائية نظراً لإحاطتها بنظام معقد من المناطق الرطبة الصحراوية (شطوط مالحة) من ثلاث جهات رئيسية؛ حيث يحد هذا الإقليم الرمي الواسع من الجهة الغربية الشطوط والبحيرات المالحة التابعة لمنطقة وادي ريغ، ومن الجهة الشمالية شط مروان وشط المغير، في حين ينفتح من الناحية الشرقية على الامتداد الطبيعي للشط التونسي الكبير المعروف تاريخياً بشط الجريد (Guezoul et al., 2013).



الوثيقة (21): موقع ولاية وادي سوف في الجزائر (Souid & Khossa, 2025)

2.1 الظروف المناخية العامة لولاية الوادي:

تتميز منطقة سوف بمناخ صحراوي جاف يعود أساسا إلى موقعها الجغرافي ضمن المناطق الصحراوية وابتعادها عن المؤثرات البحرية، حيث تعرف المنطقة بندرة التساقط وعدم انتظامه خلال السنة، وتتركز الأمطار غالبا في فصل الخريف مع تفاوت واضح في كمياتها من سنة إلى أخرى. كما تسجل درجات حرارة مرتفعة خلال فصل الصيف، في حين تنخفض شتاء، مع وجود فرق حراري يومي ملحوظ نتيجة الطبيعة الصحراوية للمنطقة. وتستقبل المنطقة كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي بسبب صفاء الغلاف الجوي وطول مدة السطوع، الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع معدلات التبخر وانخفاض نسبة الرطوبة الجوية. وتعد الرياح الرملية من أبرز الظواهر المناخية السائدة، خاصة خلال فصل الربيع، حيث تساهم في تحريك الكتلان الرملية وزحف الرمال، مما يزيد من حدة الجفاف ويؤثر على الغطاء النباتي والأنشطة الزراعية بالمنطقة (حليس، 2005).

3.1 موقع التجربة:

أخذت العينات من منطقة النخلة بولاية الوادي -الجزائر، والتي تقع جغرافيا في الجهة الجنوب الشرقي من الولاية عند إحداثيات فلكية تبلغ $33^{\circ}16'38''$ شمالا و $6^{\circ}57'06''$ شرقا. تقدر مساحة هذه المنطقة

بحوالي 700 كلم²، كما تبعد عن عاصمة الولاية مسافة تقارب 20 كيلومتر. كما أخذت الصورة لموقع العينات بالقمر الصناعي (Google Earth).



الوثيقة (22): صورة مأخوذة عبر الأقمار الصناعية توضح موقع زرع العينات (Google Earth)

4.1 المادة النباتية:

تمثلت المادة النباتية المستعملة في هذه الدراسة في شتلات الطماطم (*Solanum lycopersicum*) من صنف "امتياز"، تم اقتناؤها من مشتل فلاحي محلي ثم زرعها ميدانيا تحت الظروف البيئية الطبيعية للمنطقة المدروسة. وقد تم متابعة نمو النباتات إلى غاية الحصول على الثمار، والتي استعملت في مختلف التحاليل البيوكيميائية.

5.1 تصميم التجربة:

تمت التجربة داخل بيت بلاستيكي مصغر (Mini-greenhouse) تبلغ مساحته الإجمالية 8 م² بأبعاد هندسية تقدر بـ (4 أمتار طولا × 2 مترا عرضا). ونظرا لمتطلبات الدراسة الفيزيولوجية التي تستهدف تتبع الخواص الفيزيائية والبيوكيميائية لصنف الطماطم "امتياز" عبر مراحل نموه المختلفة، نظمت عملية زرع في أسطر تمتد على طول الـ 4 أمتار، مع ترك مسافة فاصلة بين السطر والآخر تقدر بـ 40 سم لتسهيل عمليات الخدمة والمراقبة الفيزيولوجية. وضمن السطر الواحد، غرست الشتلات بمسافة بينية ثابتة تقدر بـ 40 سم بين النبات والآخر وبمجموع إجمالي بلغ 40 نبات طماطم (شتلة).

6.1 مراحل النضج المدروسة:

عند بلوغ النباتات مرحلة الإثمار، تم تحديد العامل الفيزيولوجي المدروس (The studied factor) وهو "مرحلة النضج الثمري"، والذي قسم إلى ثلاث مراحل أساسية ومعتمدة دوليا بناء على التغير المورفولوجي للون البشرة الخارجي (Pericarp color):

الجدول (11): مراحل النضج المدروسة

المرحلة المدروسة	الرمز	وصف المرحلة
مرحلة النضج الأخضر (Mature Green Stage):	MG	تكون الثمرة قد وصلت إلى حجمها النهائي الكامل مع احتفاظها باللون الأخضر التام وغياب أي تلون أحمر أو أصفر
مرحلة التلون (Turning Stage) :	TS	وتتميز بظهور بدايات التلون البرتقالي المائل للوردي على مساحة لا تتجاوز 40% من سطح الثمرة
مرحلة النضج الأحمر (Red Stage) :	RS	تكتسب الثمرة لونها الأحمر الداكن المميز للصنف.

تم جني الثمار عشوائيا من النباتات.

7.1 جمع العينات وتحضيرها:

تم أخذ خمس حبات من ثمار نبات الطماطم من كل مرحلة نضج مدروسة، ثم غسلت جيدا بالماء. بعد ذلك قطعت الثمار إلى شرائح رقيقة جدا ونشرت فوق صفائح من الألمنيوم، ثم وضعت في حاضنة حرارية على درجة حرارة 65°م لمدة 72 ساعة كما موضح في الوثيقة (1) في الملحق. بعد عملية التجفيف، سحقت العينات باستعمال خلاط كهربائي للحصول على مسحوق ناعم للمادة الجافة المستعملة في الدراسة. بعد التجفيف والسحق يجب حفظها في ظروف لا تسمح لها بالتعفن أو التأثير على مركباتها الفعالة، لذا تم حفظ المسحوق النباتي في علب زجاجية محكمة الغلق بعيدا عن الضوء وعن الحرارة.



الوثيقة (23): مراحل النضج للثمار المدروسة

2. الخطوات التجريبية:

1.2 تقدير نسبة الرطوبة والمادة الجافة:

تم تقدير نسبة الرطوبة والمادة الجافة حسب طريقة سعدون وإحسان (2011) وذلك بأخذ حبة طماطم من كل مرحلة نضج وتقطيعها الى شرائح متساوية واخذ ثلاث شرائح ونشرها فوق ورق الألمنيوم كما توضح الوثيقة (02) في الملحق، وتجفيفها في فرن كهربائي عند درجة حرارة 65 م° الى حين ثبات وزنها، وتم حساب النسبة المئوية للرطوبة والمادة الجافة وفق المعادلتين التاليتين:

نسبة الرطوبة: % (وزن العينة الرطبة – وزن العينة الجافة) $\times 100$ / وزن المادة الرطبة

نسبة المادة الجافة: % وزن العينة الجافة $\times 100$ / وزن العينة الرطبة

2.2 تقدير الصلابة:

تم تقدير صلابة ثمار الطماطم بطريقة مقاومة الاختراق باستخدام أداة وخز قياسية ذات رأس مسطح بقطر 2مم. قبل القياس، وضعت الثمرة على كفة الميزان الرقمي الحساس ثم صفر الجهاز لضمان بدء القياس من قيمة مرجعية ثابتة. بعد ذلك، طبقت قوة الاختراق يدويا وببطء وبشكل عمودي تماما على منطقة من الثمرة، مع تثبيت أداة الوخز في حامل مناسب لتقليل اهتزاز اليد وضمان انتظام اتجاه الضغط. سجلت قيمة الذروة عند لحظة اختراق الثمرة (Holt, 1970; Jackman et al., 1990).

تم إعادة القياس في ثلاث نقاط مختلفة من الثمرة نفسها، نقوم بتحويل القراءة المسجلة (بالغرام) إلى القوة بالنيوتن وفق العلاقة:

$$F(N) = m(g) \times 9.81 \div 1000$$

m: الكتلة بالغرام.

F : قوة الصلابة بالنيوتن

1000: تحويل الغرام إلى الكيلو

3.2 تقدير درجة pH:

تم تحديد الأس الهيدروجيني (pH) وفقا لطريقة International Organization for Standardization (ISO 1842:1991). حيث أخذ 1 غ من العينة المطحونة ووضع في بيشر، ثم أضيف إليه 25 مل من الماء المقطر. بعد ذلك، خلط المزيج باستعمال جهاز الرج المغناطيسي لمدة ساعة. بعدها تم قياس قيمة pH باستعمال جهاز pH meter بعد معايرته مسبقا باستعمال المحاليل المنظمة القياسية ذات pH 4 و pH 7.

4.2 استخلاص وتقدير الكربوهيدرات:

تم إستخلاص الكربوهيدرات حسب طريقة (Shibko et al., 1966) الموصوفة من قبل (Beldi., 2007; Amira., 2013) من مسحوق ثمار الطماطم وذلك بوزن 0.5 غ من مسحوق الطماطم المجفف، وإضافة 5 مل من محلول حمض ثلاثي كلورو الأسيتيك (TCA). بعد ذلك خلط المزيج باستعمال جهاز الرج المغناطيسي لمدة 5 دقائق. ثم وضعها في أنابيب اختبار زجاجية ثم الفصل بجهاز الطرد المركزي لمدة 10 دقائق بسرعة 3000 دورة/دقيقة، وبعد انتهاء العملية تم جمع الطافي واستعماله في تقدير الكربوهيدرات الكلية.

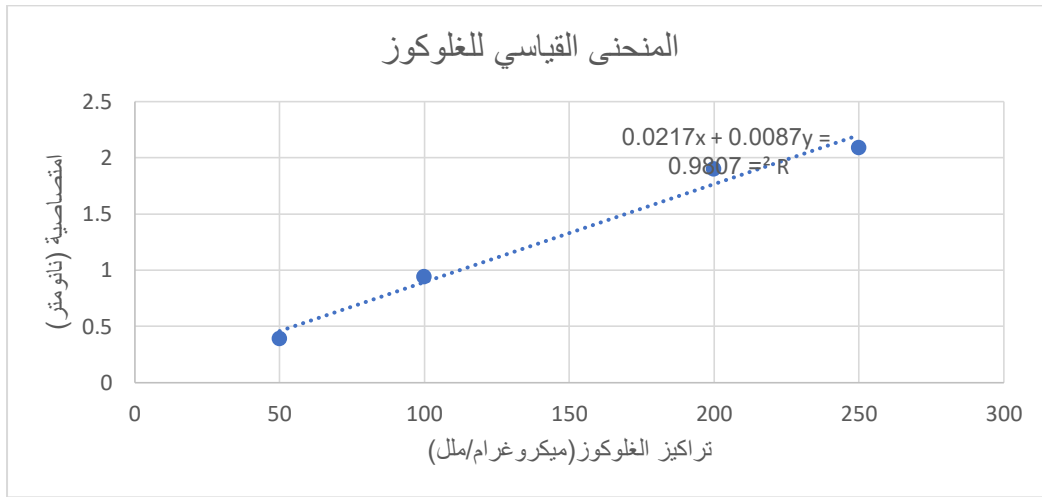
تم تقدير المحتوى الكلي من الكربوهيدرات باتباع الطريقة اللونية الموصوفة من قبل (Dubois et al., 1956) والمعدلة من طرف (بن جامع، 2008)، وذلك وفق الخطوات العملية التالية:

• تحضير المحلول القياسي للجلوكوز

- إذابة 5 ملغ من الجلوكوز النقي في 10 ملل من حمض الكبريت (1N) للحصول على محلول بتركيز 500 ug/ml.
- تحضير سلسلة من التراكيز القياسية (50، 100، 200، 250 ug/ml انطلاقا من المحلول الأم، وذلك لغرض إنشاء منحنى المعايرة.

• خطوات التقدير الكمي

- وضع 1 ملل من كل تركيز من سلسلة المحاليل القياسية المحضرة، وكذلك 1 ملل من مستخلصات العينات النباتية المراد تحليلها، في أنابيب اختبار زجاجية.
- إضافة 1 ملل من محلول الفينول بتركيز (5%) إلى كل أنبوب.
- إضافة 5 ملل من حمض الكبريت المركز (H_2SO_4) بسرعة لضمان حدوث التفاعل الحراري.
- رج الأنابيب جيدا وتركها لمدة 15 دقيقة في درجة حرارة الغرفة (كما هو موضح إليه في الملحق، الوثيقة (03)).
- قياس شدة الامتصاصية الضوئية عند طول موجة قدره 490 نانومتر باستخدام جهاز المطياف الضوئي.
- رسم المنحنى القياسي باستعمال نتائج قراءة المحاليل القياسية كما هو موضح في الوثيقة (24).



الوثيقة (24): المنحنى القياسي للغلوكوز (ميكروغرام/ملل).

5.2 استخلاص وتقدير الفينولات الكلية:

يتم تقدير المحتوى الكلي للفينولات باتباع طريقة (Singleton & Rossi, 1965) المذكورة في (بن سلامة، 2012)، والتي تعتمد على استخدام كاشف (Folin-Ciocalteu) الذي يتم إرجاعه بواسطة المركبات الفينولية لتشكيل معقد أزرق اللون. وتتم العملية وفق الخطوات التالية:

• تحضير مستخلص العينات

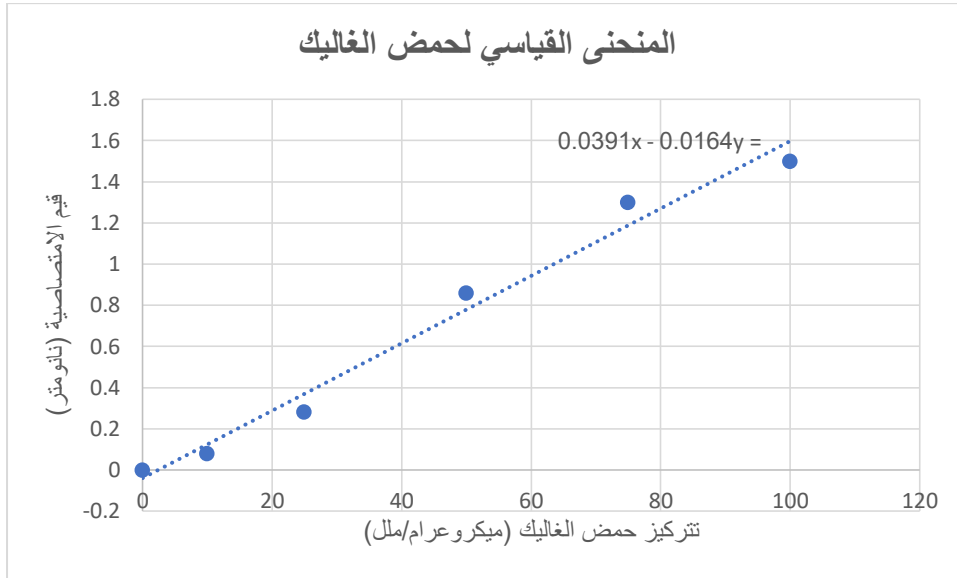
- استخلاص المواد الأيضية الثانوية حسب طريقة (Matkowski et Piorowski, 2006) بوضع 3 غ من المادة الجافة (مسحوق الطماطم) في 30 ملل من المذيب (80% ميثانول + 20% ماء مقطر).
- رج المزيج جيدا وتركه للنقع لمدة 72 ساعة في درجة حرارة المخبر، ثم ترشيح المزيج وتبخيره في حاضنة عند 45 درجة مئوية للحصول على المستخلص الميثانولي الصافي كما هو موضح في وثيقة (04) من الملحق.

• إعداد المحلول القياسي لحمض الغاليك (Standard Solution)

- إذابة 8 ملغ من حمض الغاليك في 2 ملل من الماء المقطر للحصول على محلول بتركيز 4000 ug/ml.
- تحضير سلسلة من التراكيز القياسية المتدرجة: (0، 10، 25، 50، 75، 100) ug/ml لغرض رسم منحنى المعايرة.

• خطوات تقدير محتوى الفينولات

- مزج 0.2 ملل من المستخلص الميثانولي مع 1 ملل من كاشف (Folin-Ciocalteu) المخفف 10 مرات، مع الرج الجيد للأنابيب.
- حضن الأنابيب في درجة حرارة المخبر لمدة 5 دقائق.
- إضافة 0.8 ملل من محلول كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) بتركيز (20%).
- ترك الأنابيب للتفاعل لمدة 40 دقيقة في مكان مظلم (بعيدا عن الضوء) كما هو موضح في وثيقة (05) من الملحق.
- قياس شدة الامتصاصية الضوئية عند طول موجة قدره 760 نانومتر بواسطة جهاز المطياف الضوئي.
- رسم المنحنى القياسي بدلالة امتصاصية سلسلة التراكيز القياسية المعاملة بنفس طريقة العينات.
- التعبير عن النتائج النهائية بوحدة (ملغ) من المادة الجافة المكافئة لحمض الغاليك (mg GAE/g DM).



الوثيقة (25): المنحنى القياسي لحمض الغاليك (ميكروغرام/مل).

6.2 استخلاص وتقدير الكاروتنويدات:

1.2.6 استخلاص وتقدير البيتا-كاروتان:

تم تقدير محتوى البيتا-كاروتين وفق الطريقة الموصوفة من طرف Sass-Kiss وآخرين (2005)، وذلك بإضافة 10 مل من خليط المذيبات المكون من الهكسان والأسيتون والإيثانول بنسبة (1:1:2) إلى 1 غ من مسحوق الطماطم المجففة. ثم تترك العينة تحت التحريك الميكانيكي لمدة 30 دقيقة لضمان الاستخلاص الجيد للمركبات الصبغية. وبعد ترك المزيج لفترة قصيرة حتى يحدث انفصال للطبقات، تسترجع الطبقة الهكسانية، في حين تعاد عملية الاستخلاص للطبقة السفلية باستعمال 5 مل إضافية من الهكسان تحت نفس الظروف السابقة.

بعد ذلك يجمع الراشحان ويتم قياس الامتصاصية عند طول موجي مقداره 450 نانومتر باستعمال جهاز المطياف الضوئي. وتم تحديد تراكيز البيتا-كاروتان بالاعتماد على منحنى معايرة محضر باستعمال β -carotene كمادة مرجعية. وعبرت النتائج بوحد ملغ مكافئ البيتا-كاروتين لكل 100 غ من العينة (mg E β C/100 g) وزن جاف.

2.2.6 تقدير الليكوبين:

تم تقدير محتوى الليكوبين انطلاقا من نفس الراشح المحضر سابقا لاستخلاص البيتا-كاروتان. حيث قيس الامتصاص الضوئي عند طول موجي 472 نانومتر باستخدام جهاز المطياف الضوئي. وحساب

تركيز الليكوبين بالاعتماد على معامل الامتصاص المولي للهكسان والبالغ (Rodriguez-3450, Amaya, 2001).

واستخدمت المعادلة التالية للتعبير عن النتائج بوحدة ملغ مكافئ الليكوبين لكل 100 غ من العينة:

$$C \left(mg \frac{Lycopene}{100g} \right) = \frac{Abs \times FD \times V \times 10^3}{A_{1cm}^{1\%} \times P}$$

حيث:

C: محتوى الليكوبين بوحدة ملغ مكافئ الليكوبين لكل 100 غ.

Abs: قيمة الامتصاصية التي يتم قياسها عند طول موجي 472 نانومتر.

FD: معامل التخفيف.

V: حجم مذيب الاستخلاص المستخدم بملل.

P: وزن العينة المستخدمة في التحليل بالغرام.

$A_{1cm}^{1\%}$: معامل الامتصاص المولي للهكسان (3450)

7.2 تقدير محتوى الفيتامين أ:

تعد صبغة البيتا-كاروتين الطليعة الحيوية الأساسية لفيتامين (أ) في الأنسجة النباتية (Pro-vitamin A)؛ وبناء على ذلك، تم تقدير محتوى الفيتامين (أ) في ثمار الطماطم والتعبير عنه بوحدة مكافئ الريتينول (Retinol Equivalent - RE). استندت الحسابات إلى المعايير الدولية المعتمدة من قبل منظمة الصحة العالمية (WHO) ومنظمة الأغذية والزراعة (FAO)، بتطبيق معامل التحويل الحيوي الثابت (1:6) وفقاً للمعادلة التالية (Aremu & Nweze, 2017):

$$Vitamin A (ug RE / 100g) = Beta - carotene (ug / 100g) \times 0.167$$

حيث تحول كمية البيتا-كاروتين أولاً من المليجرام إلى الميكروجرام بالضرب في 1000، ثم تضرب في المعامل 0.167 للحصول على القيمة النهائية لفيتامين (أ) بوحدة (ug RE / 100g DM) على أساس الوزن الجاف.

الفصل الثاني: النتائج والمناقشة

تمهيد

في هذا الجزء قمنا بحساب المتوسطات لمختلف المؤشرات المدروسة بهدف تلخيص النتائج وابرار التغيرات خلال مراحل النضج (MG-TS-RS). كما تم الاعتماد على تحليل التباين الاحادي (ANOVA) للتحقق من وجود او عدم وجود فروق معنوية بين المراحل المدروسة، واختبار فيشر (LSD) للمقارنة بين المتوسطات وتحديد الفروق الدقيقة بينها. وقد عرضت النتائج في جداول منظمة واعمدت بيانية لتسهيل قراءتها وتوضيح الاتجاهات العامة للبيانات.

1. محتوى الرطوبة والمادة الجافة:

أظهرت نتائج دراسة كل من محتوى الرطوبة والمادة الجافة لثمار الطماطم خلال مراحل النضج المختلفة وجود تقارب واضح بين القيم، فقد بلغت نسبة الرطوبة 93% في مرحلة النضج الأخضر (MG) و 92.41 % في المرحلة التلون (TS) ثم 92.29% في مرحلة الحمراء (RS) في حين تراوح محتوى المادة الجافة بين 6.88% و 7.71% خلال نفس المراحل، كما هو موضح في الجدول (12). وبينت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) عدم وجود فروق معنوية بين مختلف مراحل النضج لكل من محتوى الرطوبة والمادة الجافة ($p > 0.05$)، حيث صنف ضمن مجموعة إحصائية واحدة وفق اختبار Fisher LSD.

الجدول (12): محتوى الرطوبة والمادة الجافة في ثمار الطماطم خلال مراحل النضج المختلفة

محتوى الرطوبة (%)	المادة الجافة (%)	مرحلة النضج
93	6.88	MG
92.41	7.59	TS
92.29	7.71	RS
1.8752	1.8752	LSD(0.05)

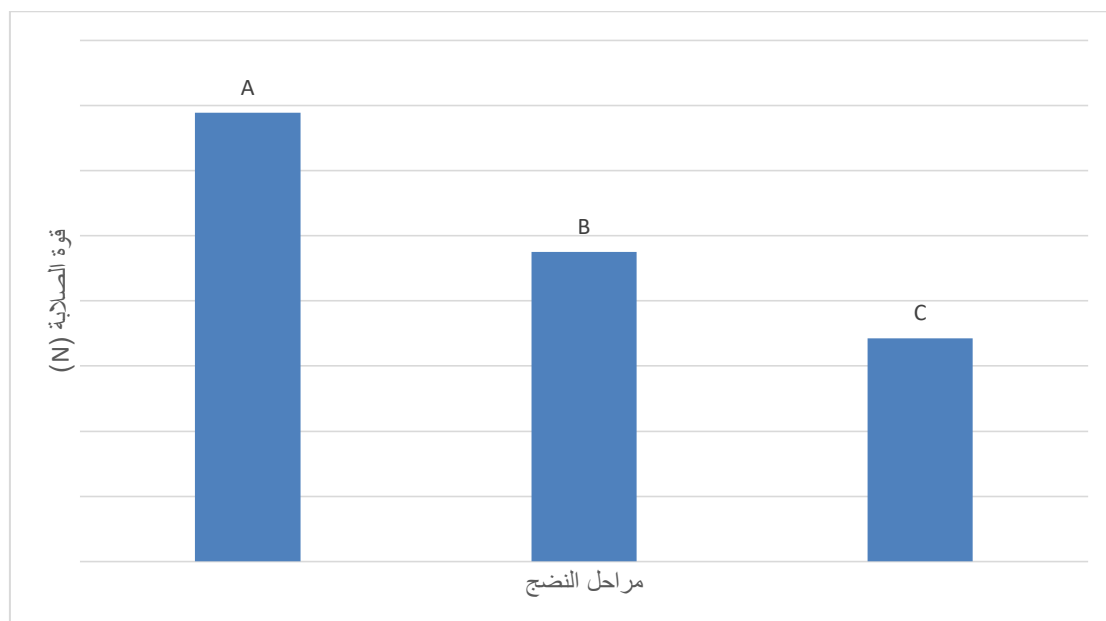
يعد محتوى المادة الجافة من أهم مؤشرات الجودة في ثمار الطماطم (Kurina et al., 2021)، حيث تتكون الثمرة الناضجة من حوالي 5-10% مادة جافة (Wang et al., 2011). فإن محتوى المادة الجافة المتحصل عليها في دراستنا خلال مراحل النضج تتوافق مع نتائج ما توصل إليه Gupta et al. (2011) و Nour et al. (2013) يمكن تفسير التقارب في نسبة محتوى المادة الجافة خلال مراحل النضج إلى وجود توازن ديناميكي بين العمليات الأيضية والتحوللات البنيوية التي تحدث داخل الثمرة أثناء النضج، حيث يستهلك جزء من المواد العضوية مثل السكريات والأحماض العضوية في عمليات التنفس لإنتاج الطاقة (Seymour et al., 2013). وفي المقابل، تستمر التحولات الإنزيمية المرتبطة بتفكيك النشاء وتحوله إلى سكريات بسيطة،

مع إعادة توزيع هذه المركبات داخل أنسجة الثمرة دون حدوث تغير واضح في الكتلة الكلية للمادة الجافة (Kader, 2002). كما تساهم التغيرات البنيوية في الجدار الخلوي وإعادة تنظيم البنية النسيجية في تعديل توزيع المكونات داخل الثمرة بدل فقدانها، مما يساعد على الحفاظ على استقرار نسبي في محتوى المادة الجافة (Brummell, 2006). وهذا يدعم النتائج المتحصل عليها في دراستنا.

في المقابل، يعتبر محتوى الرطوبة في ثمار الطماطم من أهم المؤشرات الفيزيائية المرتبطة بإنتاجية وجودة الثمار، حيث تتكون ثمرة الطماطم الناضجة من حوالي 90-95% ماء (Davies & Hobson, 1981). ويمكن تفسير تقارب محتوى الرطوبة خلال مراحل نضج ثمار الطماطم (MG، TS، RS) إلى أن الماء داخل الثمرة يكون محدود التغير لا يحدث فروق واضحة بين مراحل النضج، يرجع ذلك إلى غياب الثغور الوظيفية على سطح الثمرة (Leonardi et al., 2000)، مما يجعل فقدان الماء بكميات قليلة عبر الكيوتكل. نظرا أن الكيوتكل يمثل حاجز فيزيائي وكيميائي يقلل من نفاذية الماء ويساهم في الحفاظ على استقرار نسبي في المحتوى المائي خلال النضج (Schönherr & Bukovac, 1972). إضافة إلى ذلك فإن التغيرات المصاحبة للنضج ترتبط أساسا بالتحويلات الكيميائية الداخلية مثل تدهور الأحماض العضوية وتراكم السكريات، دون أن يرافقها تغير كبير في نسبة الرطوبة الكلية (Brady, 1987).

2. قوة الصلابة:

أظهرت نتائج الوثيقة (26) انخفاض تدريجي في صلابة ثمار الطماطم مع تقدم مراحل النضج، حيث سجلت أعلى قيمة في مرحلة النضج الأخضر (MG) وقدرت بـ (13.785 N)، تلتها مرحلة التلون (TS) بقيمة بلغت (9.503 N)، في حين سجلت أدنى قيمة في المرحلة الحمراء (RS) وقدرت بـ (6.856 N).



الوثيقة (26): صلابة الثمار الطماطم خلال مراحل النضج المختلفة

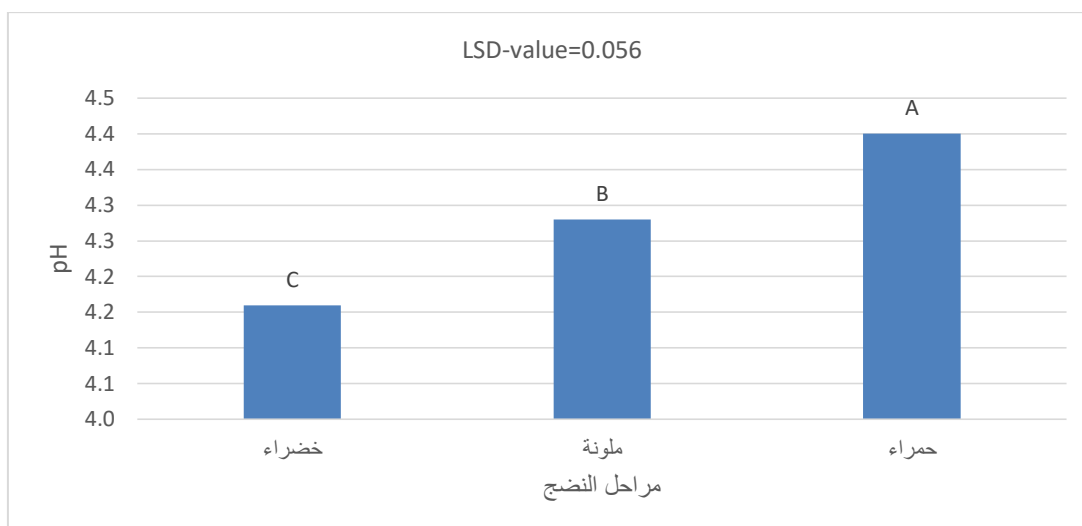
كما دلت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية جدا في درجة الحموضة ثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (RS، TS، MG) كما سمح اختبار Fisher LSD بتقسيم المراحل إلى ثلاثة مجموعات متميزة إحصائيا. احتلت مرحلة الحمراء (RS) المجموعة الأولى (A) أعلى درجة حموضة، تليها مرحلة التلون (TS) في المجموعة الثانية (B) والمرحلة النضج الأخضر (GM) في المجموعة الثالثة (C) أقل درجة الحموضة. وقد كانت جميع الفروق بين المجموعات دالة الإحصائية عن مستوى $(p < 0.001)$

تعد صلابة الثمار عاملا مهما يؤثر بشكل مباشر في جودة ما بعد الحصاد، بما في ذلك قابلية الثمار للنقل والتخزين والتسويق، إضافة إلى تأثيرها في القوام والقيمة الغذائية (Chen *et al.*, 2002). ويرجع الانخفاض التدريجي في صلابة الثمار خلال مراحل النضج إلى التغيرات التي تطرأ على مكونات الجدار الخلوي، حيث يؤدي بدء النضج إلى تفكك تدريجي في شبكة السليلوز-الهيميسليلوز، إلى جانب حدوث تغيرات في بنية البكتين والصفحة الوسطى داخل الجدار الخلوي (Brummell *et al.*, 1999; Rose & Bennett, 1999)، كما تساهم الإنزيمات المحللة لمكونات الجدار الخلوي في تسريع هذه التغيرات، مما يؤدي إلى ضعف التماسك بين الخلايا وفقدان الماء، وبالتالي تليين الثمار (Fischer & Bennett, 1991; Gapper *et al.*, 2013).

وحسب Campbell *et al.* (1990) فإن فقدان الأنسجة لصلابتها أثناء نضج ثمار الطماطم يعود إلى ارتفاع إنتاج الإيثيلين، المرتبط بزيادة معدل التنفس، مما يؤدي إلى تنشيط آليات التلين وتغير مكونات جدران الخلايا وتبدل تركيبها، وهذا ما يفسر التغير في الصلابة الثمار خلال مراحل النضج.

3. درجة الحموضة (pH):

أظهرت النتائج الدراسة (الوثيقة 27) زيادة في قيم درجة الحموضة (pH) خلال مراحل نضج ثمار الطماطم، حيث سجلت مرحلة النضج الأخضر (MG) قيمة 4.2، تليها مرحلة الملونة (TS) بقيمة 4.3، ثم مرحلة الحمراء (RS) بقيمة 4.4.



الوثيقة (27): درجة حموضة مختلف مراحل النضج

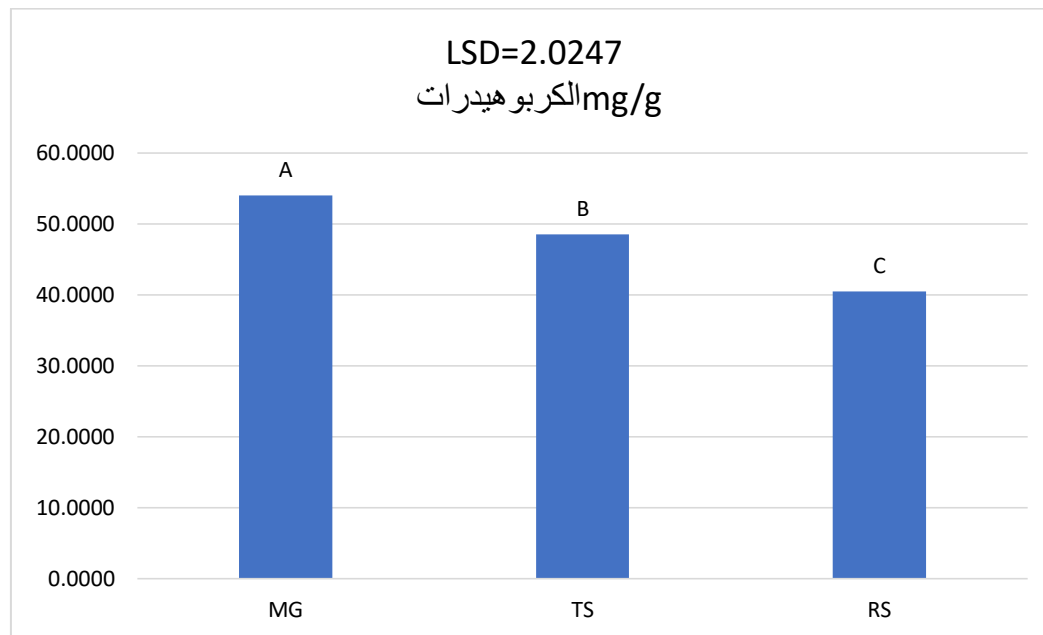
كما دلت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية جدا في درجة الحموضة ثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (RS، TS، MG) كما سمح اختبار Fisher LSD بتقسيم المراحل إلى ثلاثة مجموعات متميزة إحصائيا. احتلت مرحلة الحمراء (RS) المجموعة الأولى (A) أعلى درجة حموضة، تليها مرحلة التلون (TS) في المجموعة الثانية (B) والمرحلة النضج الأخضر (GM) في المجموعة الثالثة (C) أقل درجة الحموضة. وقد كانت جميع الفروق بين المجموعات دالة الإحصائية عن مستوى ($p < 0.001$)

تعتبر درجة الحموضة عاملا رئيسيا في تحديد جودة الطماطم (Hong & Tsou, 1998). ويمكن تفسير الزيادة في درجة الحموضة (pH) خلال مراحل نضج ثمار الطماطم، حيث أثناء النضج يحدث استهلاك للأحماض العضوية في عملية التنفس (Albertini et al., 2006)، وقد تتحول هذه الأحماض إلى سكريات، وهذا ما يؤدي إلى انخفاض الحموضة وارتفاع قيمة pH (Bareiro & Sandoval, 2006). وتعد درجة الحموضة المتحصل عليها في دراستنا لثمار الطماطم خلال مختلف مراحل النضج ضمن متطلبات منظمة الأغذية والزراعة والصحة العالمية. ووفق ما أشار إليه . Campos et al. (2006)، فإن أصناف الطماطم المرغوبة تكون فيها درجة pH أقل من 4.5، في دراسته حول إنتاجية وجودة ثمار الطماطم تحت تأثير الري بالمياه المالحة. كما تساهم درجة الحموضة في سلامة الأغذية، حيث إنها تعمل على إعاقاة تلف المواد الغذائية من خلال الحد من انتشار الكائنات الحية الدقيقة (Giordano, 2000).

4. محتوى الكربوهيدرات:

أظهرت نتائج الدراسة انخفاضا تدريجيا في محتوى الكربوهيدرات الكلية لثمار الطماطم (Solanum lycopersicum L) عبر مراحل النضج الثلاث، إذ سجلت المرحلة الخضراء (MG) أعلى قيمة بلغت 54.01

mg/g، تلتها المرحلة الملونة (TS) بـ 48.53 mg/g، ثم المرحلة الحمراء الناضجة (RS) بأدنى قيمة بلغت 40.45 mg/g كما هو موضح في الوثيقة (28).



الوثيقة (28): محتوى الكربوهيدرات لمراحل النضج الثلاث (RS، TS، MG).

كما أوضحت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية جدا في محتوى الكربوهيدرات الكلية لثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (RS، TS، MG). كما سمح اختبار Fisher LSD بتقسيم المراحل إلى ثلاث مجموعات متميزة إحصائيا. احتلت مرحلة النضج الأخضر (MG) المجموعة الأولى (A) بأعلى محتوى، تلتها مرحلة التلون (TS) في المجموعة الثانية (B)، وجاءت المرحلة الحمراء (RS) في المجموعة الثالثة (C) بأدنى محتوى. وقد كانت جميع الفروق بين المجموعات دالة إحصائيا عند مستوى ($P < 0.001$).

يكشف الاتجاه التنازلي في محتوى الكربوهيدرات الكلية (من 54.006 mg/g في المرحلة الخضراء إلى 40.454 mg/g في المرحلة الحمراء) عن تحولات أيضية تشهدها ثمرة الطماطم خلال نضجها. تتوافق هذه النتائج ($MG > TS > RS$) مع ما أفاد به Antala et al. (2025) الذين رصدوا في أربعة أصناف من الطماطم انخفاضا تدريجيا في محتوى الكربوهيدرات الكلية من المرحلة MG نحو RS بنسبة تصل إلى 20.09%. وبالمثل، يتوازى هذا التدرج مع دراسة Okiror et al. (2017) على صنف Ghalia 281، حيث بلغت الكربوهيدرات ذروتها في مرحلة النضج الأخضر ثم انخفضت مع بداية مرحلة التلون لتواصل هبوطها في المراحل اللاحقة مع تقدم النضج.

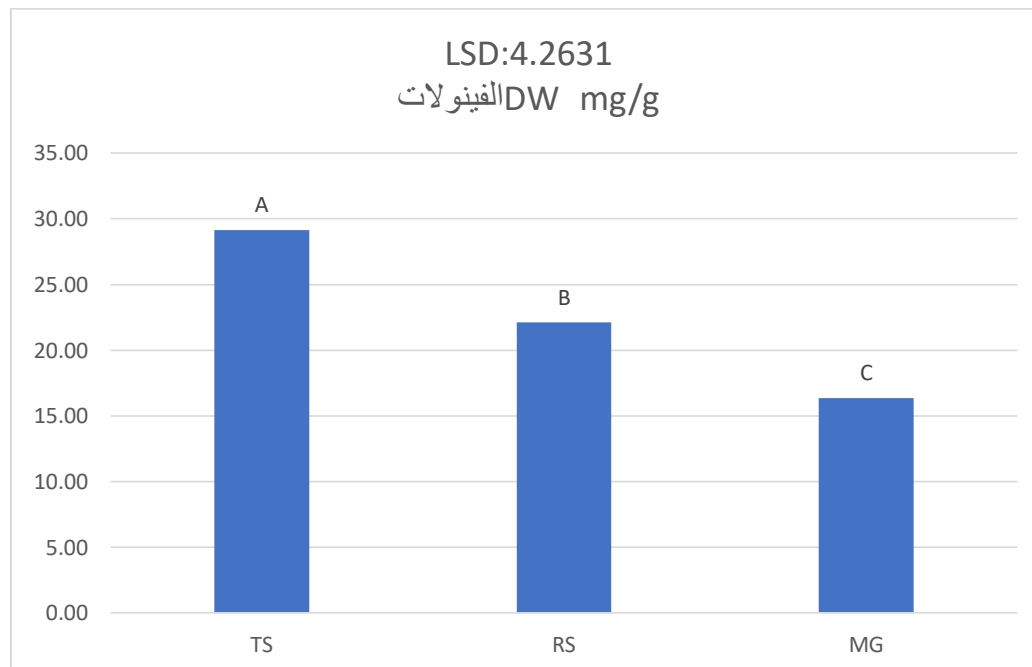
ويعود هذا السلوك الفسيولوجي إلى جملة من التحولات الإنزيمية المتسلسلة؛ إذ تبدأ الثمرة الخضراء دورها ك (حوض امتصاص) أي كمركز جاذب للمغذيات، حيث تستقطب الكربون لتخزينه في صورة نشا

وسكروز. ومع الدخول في مرحلة النضج، تصل الثمرة إلى ما يُعرف بـ (قمة النضج التنفسية - Climacteric Rise) وهي مرحلة يزداد فيها معدل تنفس الثمرة بشكل حاد. هنا، وبفعل هرمون الإيثيلين، تنشط الإنزيمات المسؤولة عن تفكيك النشا (كالميلاز) وأيض السكريات، مما ينتج عنه تحليل السكروز إلى سكريات أحادية (غلوكوز وفركتوز) تُستغل كوقود وطاقة لإنتاج صبغات الكاروتينات الملونة كالليكوبين (Seymour et al., 2013).

بناءً على ذلك، فإن الانخفاض المرصود في الكربوهيدرات الكلية لا يعني تدهورا في القيمة الغذائية، بل يعكس تحولا نوعيا من أشكال معقدة وبنائية (كالنشا والبكتين) إلى سكريات ذائبة بسيطة، وهو ما يفسر ازدياد حلاوة الثمرة عند النضج الكامل (Zhu et al., 2022).

5. محتوى الفينولات:

بينت نتائج الدراسة وجود فروق في محتوى الفينولات الكلية بين مراحل النضج الثلاث لثمار الطماطم كما هو موضح في وثيقة (29)، إذ سجلت مرحلة النضج الأخضر (MG) أدنى متوسط بلغ 16.36 mg/g ، ثم ارتفع ارتفاعا ملحوظا في مرحلة التلون (TS) ليبلغ ذروته عند 29.14 mg/g ، قبل أن ينخفض انخفاضاً طفيفاً في مرحلة النضج الأحمر (RS) إلى 22.10 mg/g .



الوثيقة (29): محتوى الفينولات الكلية لمختلف مراحل النضج.

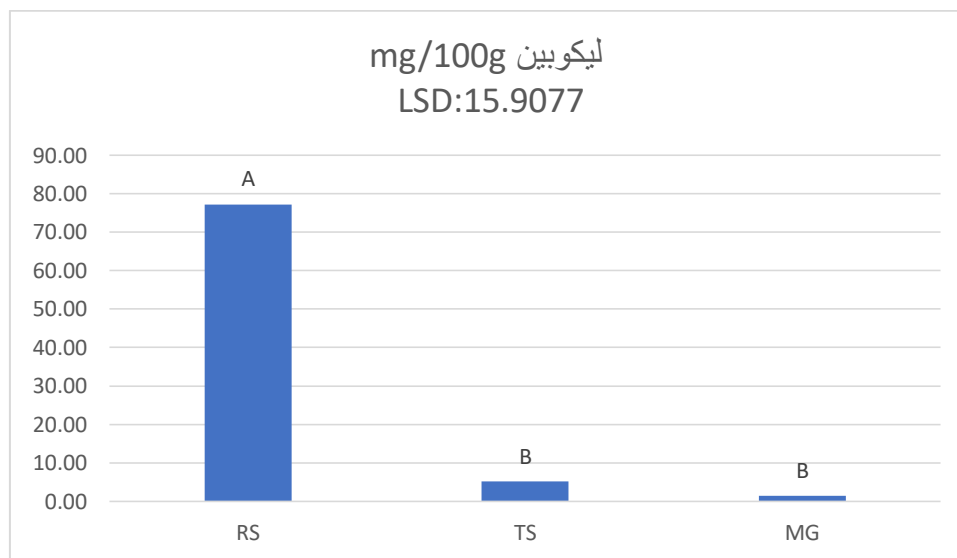
أظهرت نتائج تحليل التباين الأحادي (ANOVA) وجود فروق ذات دلالة إحصائية معنوية عالية جدا ($p < 0.001$) في محتوى الفينولات الكلية بين مراحل النضج الثلاث لثمار الطماطم، إذ سجلت مرحلة (MG) أدنى متوسط، ثم ارتفع ارتفاعا ملحوظا في مرحلة التلون (TS) ليبلغ ذروته، قبل أن ينخفض انخفاضاً طفيفاً

في مرحلة النضج الأحمر (RS)، وقد أكد اختبار Fisher LSD أن الفروق بين جميع المراحل دالة إحصائياً وأن كل مرحلة تنتمي إلى مجموعة مستقلة A,B,C.

ويفسر الارتفاع الكبير في مرحلة التلون بتنشيط مسار الفينيل بروبانويد الذي يبلغ أقصى نشاطه في بداية التحولات اللونية بفعل هرمون الإثيلين (Giovannoni, 2004)، في حين يفسر الانخفاض في مرحلة النضج الأحمر إلى تصاعد نشاط إنزيمات الأكسدة كالبوليفينول أوكسيداز (PPO) التي تسرع في تحلل المركبات الفينولية مع اكتمال النضج (Toivonen & Brummell, 2008). وتتوافق هذه النتائج مع ما رصده Kaur *et al* (2012) من أن محتوى الفينولات يبلغ ذروته في المراحل الانتقالية للتلون قبل أن يتراجع نسبياً عند النضج الكامل، وكذلك مع ما أشار إليه Tomas-Barberan & Espin (2001) من أن التوازن بين تخليق المركبات الفينولية وتحللها الإنزيمي يحدد المحتوى النهائي في كل مرحلة نضج.

6. محتوى الليكوبين:

تشير نتائج الدراسة إلى وجود زيادة تدريجية واضحة في محتوى الليكوبين تبعاً لتقدم مراحل نضج الثمار. حيث سجلت الثمار في مرحلة النضج الأخضر (MG) أدنى محتوى 1.50 mg/100g، تلاها زيادة طفيفة في مرحلة التلون (TS) ليصل إلى 5.13 mg/100g وفي المقابل، شهدت مرحلة النضج الأحمر (RS) زيادة كبيرة، حيث بلغ محتوى الليكوبين ذروته عند 77.20 mg/100g (الوثيقة 30).



الوثيقة (30): محتوى الليكوبين في مراحل النضج الثلاث.

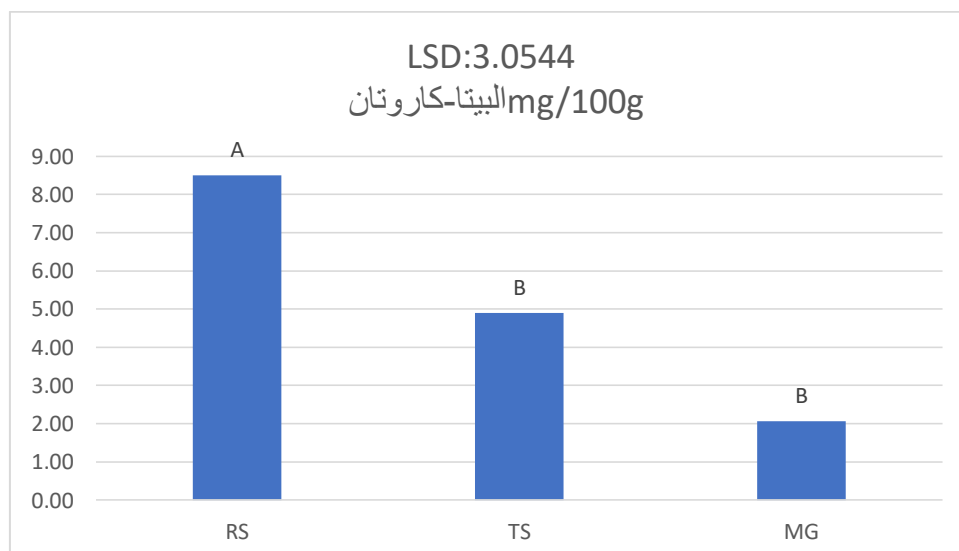
كما أوضحت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية جداً في محتوى الليكوبين لثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (MG، TS، RS). وقد أتاح اختبار Fisher LSD تصنيف المراحل إلى مجموعتين متميزتين إحصائياً، إذ انفردت مرحلة النضج الأحمر (RS) بالمجموعة الأولى (A) بأعلى

محتوى من الليكوبين، في حين ضمت المجموعة الثانية (B) كلا من مرحلة التلون (TS) ومرحلة النضج الأخضر (MG) بمحتوى أدنى بكثير. وقد كانت الفروق بين المجموعة الأولى وكلتا المجموعتين الأخريين دالة إحصائياً عند مستوى ($P < 0.001$)

أظهرت نتائج الدراسة وجود فروق كبيرة في محتوى الليكوبين بين مراحل النضج الثلاث، حيث سجل في مرحلة النضج الأحمر ارتفاع كبير في محتوى الليكوبين وهذا ما توافق مع العديد من الدراسات التي أكدت أن تراكم الليكوبين في ثمار الطماطم يرتبط ارتباطاً مباشراً بمرحلة النضج الأحمر، ففي مرحلة النضج الأخضر يسود الكلوروفيل بصفته الصبغة المهيمنة ويكون محتوى الليكوبين شبه منعدم، في حين يبدأ تخليق الليكوبين فعلياً مع انطلاق عملية النضج وتحلل الكلوروفيل (Rodriguez-Amaya, 2001). وقد أكد هذا النتائج كل من Helyes et al (2006) وCoyago-Cruz et al (2018) اللذان أوضحا أن محتوى الليكوبين يشهد زيادة كبيرة في المراحل المتأخرة من النضج. ويفسر هذا النمط بيولوجياً بأن تخليق الليكوبين يرتبط ارتباطاً مباشراً بمسار الكاروتينات الذي لا ينشط بصورة ملحوظة إلا في المراحل الأخيرة من النضج حين يتحلل الصانعات الخضراء (Chloroplasts) وتتحول إلى صانعات ملونة (Chromoplasts)، مما ينشط إنزيمات تخليق الليكوبين كالفيتون ديساتيوريز (PDS) مما يؤدي إلى زيادة تخليق الليكوبين وتراكمه في مرحلة النضج الأحمر (Bramley, 2002).

7. محتوى البيتا-كاروتان:

تظهر نتائج الدراسة ارتفاع تدريجي في محتوى البيتا-كاروتان لثمار الطماطم بالتزامن مع تقدم مراحل النضج (MG, TS, RS). حيث سجلت الثمار في طور الأخضر (MG) أدنى محتوى بقيمة 2.07 mg/100g، ليرتفع بعد ذلك في مرحلة التلون (TS) ويصل إلى 4.90 mg/100g. وفي المقابل، حققت الثمار في مرحلة الأحمر (RS) ارتفاع ملحوظ لتسجل ذروة محتواها عند 8.50 mg/100g (الوثيقة 31).



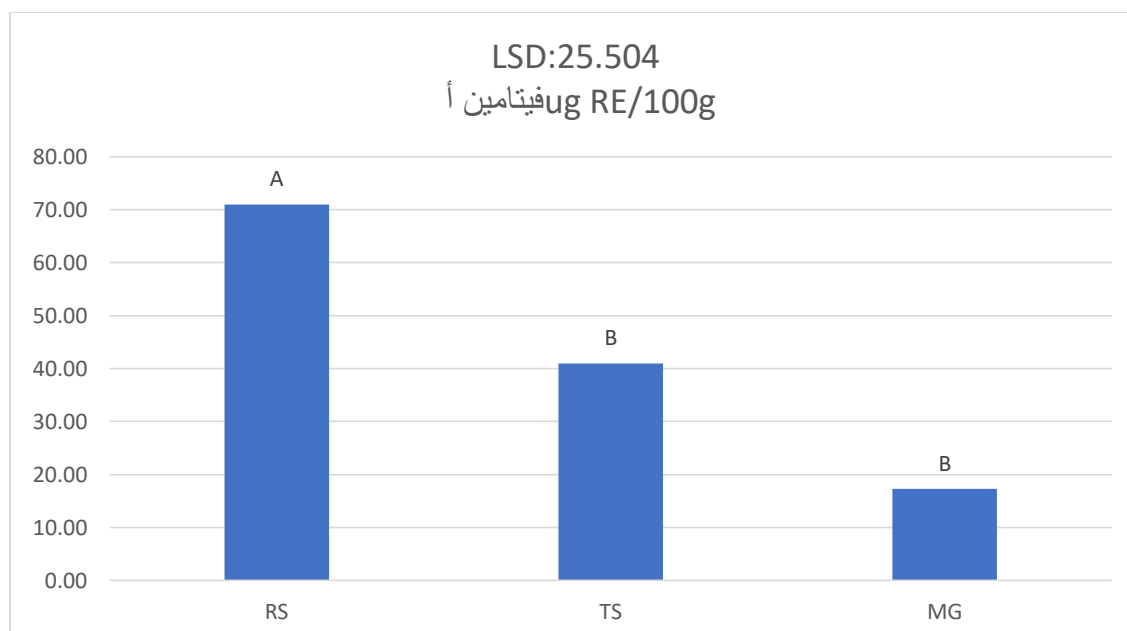
الوثيقة (31): محتوى البيتا-كاروتان في مختلف مراحل النضج (MG, TS, RS).

كما أوضحت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية في محتوى البيتاكاروتين لثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (MG، TS، RS) عند مستوى ($P < 0.001$) وقد أتاح اختبار Fisher LSD تصنيف المراحل إلى مجموعتين متميزتين إحصائياً، إذ انفردت مرحلة النضج الأحمر (RS) بالمجموعة الأولى (A) بأعلى محتوى من البيتاكاروتين، في حين ضمت المجموعة الثانية (B) كلا من مرحلة التلون (TS) ومرحلة النضج الأخضر (MG) بمحتوى أدنى. وقد كانت الفروق بين المجموعة الأولى وكلتا المجموعتين الأخريين دالة إحصائياً.

يفسر الارتفاع التدريجي لمحتوى البيتاكاروتان إلى تحول البلاستيدات الخضراء (Chloroplasts) التي تهيم على المرحلة الخضراء وتخزن الكلوروفيل، إلى بلاستيدات ملونة (Chromoplasts) تخصص في تخليق وتخزين الكاروتينات بكفاءة عالية، وهو ما يتزامن مع تثبيط جينات الكلوروفيل وتفعيل جينات مسار الكاروتينويد (Bramley, 2002). كما يرتبط هذا الارتفاع الكبير في مرحلة النضج الأحمر بالدور الهرموني للإيثيلين في الثمار الكليماكتيرية، والذي يحفز تفعيل جينات وإنزيمات مسار التخليق الحيوي للكاروتينات، وعلى رأسها إنزيم phytoene synthase (PSY1) المحدد لسرعة التخليق (Fraser et al., 1994). وتتوافق هذه النتائج مع دراسات سابقة أثبتت صحة هذا التطور التراكمي، حيث أكد الباحثون أن محتوى البيتاكاروتان يتصاعد تدريجياً مع تقدم النضج ليمتلك أعلى محتوى في ثمار المرحلة الحمراء مقارنة بمرحلة النضج الأخضر (Lenucci et al., 2006)، وهو نطاق قدر في دراسات أخرى بـ 3.5 إلى 10.0 mg/100g (Abushita et al., 2000)، مما يتوافق تماماً مع النتائج المتحصل عليها في دراستنا.

8. محتوى الفيتامين أ:

تشير نتائج الدراسة (الوثيقة 32) إلى زيادة في محتوى فيتامين أ لثمار الطماطم بالتزامن مع تقدم مراحل النضج (MG, TS, RS). حيث سجلت الثمار في الطور الأخضر (MG) أدنى محتوى بمعدل 17.26 ug RE/100g، ليرتفع هذا المحتوى في طور التلون (TS) ويصل إلى 40.92 ug RE/100g. وفي المقابل، حققت الثمار في طور النضج الأحمر الكامل (RS) أعلى محتوى لتسجل ذروة محتواها الفيتاميني عند 70.98 ug RE/100g.



الوثيقة (32): محتوى الفيتامين أ في مختلف مراحل النضج (MG, TS, RS).

كما أوضحت نتائج التحليل الإحصائي (ANOVA) وجود فروق معنوية عالية في محتوى فيتامين أ لثمار الطماطم بين مختلف مراحل النضج (RS، TS، MG) عند مستوى ($P < 0.001$). وقد أتاح اختبار Fisher LSD تصنيف المراحل إلى مجموعتين متميزتين إحصائياً، إذ انفردت مرحلة النضج الأحمر (RS) بالمجموعة الأولى (A) بأعلى محتوى من فيتامين أ، في حين ضمت المجموعة الثانية (B) كلا من مرحلة التلون (TS) ومرحلة النضج الأخضر (MG) بمحتوى أدنى.

ويفسر هذا الارتفاع التدريجي إلى ارتباط فيتامين أ المباشر بمحتوى البيتا-كاروتين؛ حيث يشترك فيتامين أ (كمكافئ الريتينول) مباشرة من تفكك جزيئات البيتا-كاروتين، والتي تتضاعف بدورها كمياً بفعل التحولات البنيوية للبلاستيدات الخضراء وتحولها إلى بلاستيدات ملونة (Chromoplasts) وتنشيط مسارات التخليق الحيوية مع تقدم النضج (Rodriguez-Amaya, 2001). كما يرجع هذا التراكم السريع عند الانتقال إلى مرحلة النضج الكامل (RS) إلى الدور الهرموني للإيثيلين في الثمار الكليماكتيرية، والذي يحفز التعبير الجيني لإنزيمات مسار التخليق الكاروتيني أبرزها إنزيم phytoene synthase (PSY1) المحدد لسرعة التخليق (Fraser *et al.*, 1994). وتتوافق هذه النتائج التجريبية تماماً مع دراسات سابقة عززت صحة هذا الاتجاه التصاعدي؛ حيث أكدت الدراسات السابقة أن محتوى فيتامين أ يتضاعف بوضوح مسجلاً في الثمار الحمراء الناضجة فيما تتراوح بين 60-95 ug RE/100g، وهو نطاق ينسجم تماماً مع المتوسط المسجل في دراستنا الحالية (Abushita *et al.*, 2000). كما بينت دراسات أخرى أن مرحلة النضج الكامل ترتبط ارتباطاً وثيقاً بأعلى محتوى من الكاروتينات ذات النشاط الفيتاميني، وأن الاختلافات البيئية أو الزراعية قد تؤثر في القيم المطلقة لكنها لا تغير أبداً من هذا المسار التراكمي العام (Dumas *et al.*, 2003).

خلاصة عامة

خلاصة عامة

أنجزت هذه الدراسة لتتبع الديناميكية الفسيولوجية والتحوليات البيوكيميائية التي ترافق نضج ثمار نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.) صنف "امتياز"، المزروع تحت نظام البيوت البلاستيكية المحمية في البيئة الصحراوية لولاية الوادي. وقد سمح التقييم الكمي والنوعي للمؤشرات الفيزيائية والبيوكيميائية عبر أطوار النضج الثلاثة: مرحلة النضج الأخضر (MG)، مرحلة التلون (TS)، ومرحلة النضج الأحمر (RS) لفهم التغيرات في قيمتها الغذائية والتكنولوجية.

من خلال الدراسة سجل تباين حاد في الخصائص اللونية لبشرة الثمار عبر مراحل النضج، وهو ما يعكس تحولا جذريا في التركيب الصبغي للثمرة؛ حيث تميزت مرحلة النضج الأخضر بسيادة تامة للون الأخضر القاتم نتيجة هيمنة صبغات الكلوروفيل اليخضورية في البلاستيدات الخضراء وغياب تام لصبغات الكاروتينات. كما وتوصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج على المستوى الفيزيائي والبيوكيميائي

- على المستوى الفيزيائي: أظهرت الثمار تراجعاً حاداً في قوة الصلابة الميكانيكية كلما تقدمت نحو النضج بفعل التحلل الإنزيمي المدفوع بالإيثيلين لمكونات الجدار الخلوي. وفي المقابل، تميزت الثمار باستقرار وثبات إحصائي واضح في محتوى المادة الجافة ونسبة الرطوبة الكلية عبر كافة المراحل، مما يثبت الكفاءة للصنف "امتياز" في الحفاظ على التوازن المائي للثمرة وتنشيط النتج في الظروف الصحراوية الحارة. كما سجل ارتفاع تدريجي في قيم الأس الهيدروجيني (pH) يعكس استهلاك الأحماض العضوية الحرة في عملية التنفس الكليماكتيري للثمار.
- على المستوى البيوكيميائي والوظيفي: كشفت النتائج عن تراجع تدريجي في محتوى الكربوهيدرات الكلية نتيجة تحلل النشاء وتحوله إلى سكريات أحادية بسيطة تغذي مسارات الأيض الثانوي. وتجلي هذا التحول بوضوح في الارتفاع الحاد للمركبات الفينولية ومضادات الأكسدة التي بلغت ذروتها في مرحلة التلون، متزامنة مع زيادة تراكمية في مستويات الصبغات الكاروتينية، لا سيما الليكوبين والبيتا-كاروتين، ومحتوى فيتامين (أ) المشتق في مرحلة النضج الأحمر الكامل.

تؤكد هذه الدراسة أن مرحلة النضج الأحمر هي الكفيلة بمنح ثمار الطماطم صنف "امتياز" أعلى قيمة غذائية، وصحية، ووظيفية للمستهلك بفضل غناها بمضادات الأكسدة والفيتامينات. ومع ذلك، فإن مرحلة التلون (TS) تمثل "مؤشر الجني الأمثل" للتسويق ونقل المحاصيل إلى مسافات بعيدة، حيث تجمع الثمار في هذا الطور بين محتوى متميز من الفينولات الكلية وقوة صلابة ميكانيكية عالية تضمن مقاومتها للتلف والخدوش، مع قدرتها الذاتية الفسيولوجية على استكمال تلونها ونضجها البيوكيميائي بعد الحصاد بفضل طبيعتها الفرازية (Climacteric fruits).

وفي ضوء ما توصلت إليه هذه الدراسة، يتضح أن البحث في التركيب الكيميائي والبيوكيميائي لثمار الطماطم في ظروف ولاية الوادي يفتح آفاقا بحثية واسعة تستدعي الاستكشاف، وفي مقدمتها: توسيع نطاق الدراسة ليشمل تتبع إجراء دراسات فيزيولوجية وبيوكيميائية مقارنة لتتبع ديناميكية ونوعية نضج ثمار الطماطم بين مسارين مختلفين: النضج الطبيعي المستكمل على النبات (On-vine ripening)، والنضج الاصطناعي المستحث داخل المخازن بعد الجني المبكر (Off-vine ripening) تحت ظروف تكنولوجية محكمة. ويهدف هذا الأفق إلى تحديد مدى تأثير الانفصال المبكر للثمرة عن النبات الأم (والذي يقطع إمدادات الماء، والسكريات، والمغذيات) على الكفاءة النهائية لتخليق الصبغات الكاروتينية كالليكوبين، ومستويات الفينولات الكلية، ومدى الحفاظ على قوة الصلابة الميكانيكية للنسيج الخلوي، مما يوفر دليلا علميا وتطبيقيا للفلاحين حول الطريقة المثلى التي تضمن أعلى جودة تسويقية وقيمة غذائية للمحصول عند توجيهه للأسواق البعيدة.

قائمة المراجع

المراجع باللغة العربية:

1. بن جامع، ع. (2008). المحتوى الكيميائي لأوراق وبذور أصناف من القمح الصلب *Triticum durum* (Desf) النامية تحت ظروف الإجهاد المائي والمعاملة بالأوكسين (AIA) نقعاً ورشاً (مذكرة ماجستير). جامعة منتوري قسنطينة، الجزائر.
2. بن سالم، ع. (2012). النشاطات المضادة للأكسدة والمثبطة لإنزيم الزانثين أوكسيداز للمستخلصات الورقية [رسالة ماجستير]. جامعة فرحات عباس، الجزائر.
3. جابر، ر. (2015). الزراعة في إقليم وادي سوف [رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة الإخوة منتوري قسنطينة].
4. حجاج، أ.، وخيروش، س. (2022). دراسة ميكانيزمات المقاومة للإجهاد الملحي لدى نبات نصف حساس للملوحة [مذكرة لنيل شهادة الماستر]. المركز الجامعي عبد الحفيظ بوالصوف ميلة.
5. حليس، ي. (2005). الموسوعة النباتية لمنطقة سوف: النباتات الصحراوية الشائعة في منطقة العرق الشرقي الكبير. مطبعة الوليد.
6. سعدون، ع.، وإحسان، ع. (2011). أثر الصنف والرش بالـ *Liquhumus* في الحاصل وبعض الصفات النوعية لدرنات البطاطا للصنفين *Aladin* و *Burren*. مجلة الكوفة، العدد 2، 117-126.
7. ضنيات، ر.، ومصباحي، ص. (2019). دراسة تأثير آليات النضج على الخصائص الكيميائية لثمار الطماطم (*Solanum lycopersicum* L). [مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة الشهيد حمة لخضر - الوادي، كلية علوم الطبيعة والحياة، قسم البيولوجيا].
8. مديرية المصالح الفلاحية لولاية الوادي. (2026). إحصائيات المساحات المزروعة ومردودية الطماطم للسنوات 2025/2021 [وثيقة غير منشورة]. وزارة الفلاحة والتنمية الريفية، الوادي، الجزائر.

المراجع باللغة الأجنبية:

1. Abushita, A. A., Daood, H. G., & Biacs, P. A. (2000). Change in carotenoids and antioxidant vitamins in tomato as a function of varietal and technological factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(6), 2075–2081. <https://doi.org/10.1021/jf990715p>
2. Albertini, M. V., Carcouet, E., Pailly, O., Gambotti, C., Luro, F., & Berti, L. (2006). Changes in organic acids and sugars during early stages of development of acidic and acidless citrus fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(21), 8335–8339. <https://doi.org/10.1021/jf061648j>
3. Ali, M. Y., Sina, A. A. I., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, M. I., & Gan, S. H. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their

impact on human health and disease: A review. *Foods*, 10(1), 45.
<https://doi.org/10.3390/foods10010045>

4. Almagro, L., Correa-Sabater, J. M., Sabater-Jara, A. B., & Pedreño, M. Á. (2022). Biotechnological production of β -carotene using plant in vitro cultures. *Planta*, 256(2), 43.
<https://doi.org/10.1007/s00425-022-03953-9>

5. Almeida, F. H. M., & Oliveira, A. H. (2025). Doenças, pragas e distúrbios fisiológicos em
6. tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.). *Aracê*, 7(5), 25660–25677.
<https://doi.org/10.56238/arev7n5-264>

7. Amira, K. (2013). Caractérisation des hydrocarbures cuticulaires et l'effet d'un régulateur de croissance, RH-0345, sur le développement et la reproduction de *Culex pipiens* [Thèse de doctorat]. Université d'Annaba, Algérie.

8. Anantharaju, P. G., Gowda, P. C., Vimalbike, M. G., & Madhunapantula, S. V. (2016). An overview on the role of dietary phenolics for the treatment of cancers. *Nutrition Journal*, 15(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0217-2>

9. Antala, P. A., Chakote, A., Varshney, N., Suthar, K., Singh, D., Narwade, A., Patel, K., Gandhi, K., Singh, S., & Karmakar, N. (2025). Phytochemical and metabolic changes associated with ripening of *Lycopersicon esculentum*. *Scientific Reports*, 15, Article 10692.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-95255-9>

10. Arballo, J., Amengual, J., & Erdman, J. W. (2021). Lycopene: Digestion, absorption, metabolism, and excretion. *Antioxidants*, 10(3), 342, 1–20.
<https://doi.org/10.3390/antiox10030342>

11. Aremu, S. O., & Nweze, C. C. (2017). Determination of vitamin A content from selected Nigerian fruits using spectrophotometric method. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 52(2), 153–158. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v52i2.32924>

12. Atherton, J. G., & Rudich, J. (Eds.). (1986). *The tomato crop: A scientific basis for improvement*. Springer Science & Business Media.

13. Bachir Raho, G., & Benali, M. (2021). Phenolic compounds: Structures and activities. *Journal of Medical Cornvus*, 2(5), 6–24. <http://gulfpublishers.com/journal/>

14. Baranov, D., Dolgov, S., & Timerbaev, V. (2024). New advances in the study of regulation of tomato flowering-related genes using biotechnological approaches. *Plants*, 13(3), Article 359. <https://doi.org/10.3390/plants13030359>

15. Bareiro, J., & Sandoval, A. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. *Equinoccio*.

16. Beldi, H. (2007). Étude de *Gambusia affinis* (poisson, téléostéen) et *Donax trunculus* (mollusque, pélecypode) : Écologie, physiologie et impacts de quelques polluants [Thèse de doctorat]. Université d'Annaba, Algérie.
17. BeMiller, J. N., & Huber, K. C. (2018). *Starch: Chemistry and technology* (3rd ed.). Academic Press.
18. Bergau, N., Bennewitz, S., Syrowatka, F., Hause, G., & Tissier, A. (2015). The development of type VI glandular trichomes in the cultivated tomato *Solanum lycopersicum* and a related wild species *S. habrochaites*. *BMC Plant Biology*, 15, 289.
19. Brewer, M. T., Moyseenko, J. B., Monforte, A. J., & van der Knaap, E. (2007). Morphological variation in tomato: A comprehensive study of quantitative trait loci controlling fruit shape and development. *Journal of Experimental Botany*, 58(6), 1339–1349. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl301>
20. Bhattacharya, A., Sood, P., & Citovsky, V. (2010). The roles of plant phenolics in defence and communication during *Agrobacterium* and *Rhizobium* infection. *Molecular Plant Pathology*, 11(5), 705–719. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00625.x>
21. Bogacz-Radomska, L., & Harasym, J. (2018). β -Carotene—properties and production methods. *Food Quality and Safety*, 2(2), 69–74. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy004>
22. Bouzghaya, A., & Omane, R. (2024). Contribution to the study of fungal diseases of tomatoes in the El Oued region [Master's dissertation]. Echahid Hamma Lakhdar University – El Oued, Faculty of Natural and Life Sciences.
23. Brady, C. J. (1987). Fruit ripening. *Annual Review of Plant Physiology*, 38, 155–178. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.38.060187.001103>
24. Bramley, P. M. (2000). Is lycopene beneficial to human health? *Phytochemistry*, 54(3), 233–236. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00103-5)
25. Bramley, P. M. (2002). Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. *Journal of Experimental Botany*, 53(377), 2107–2113. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf059>
26. Brummell, D. A. (2006). Cell wall disassembly in ripening fruit. *Functional Plant Biology*, 33(2), 103–119. <https://doi.org/10.1071/FP05234>
27. Brummell, D. A., Harpster, M. H., & Dunsmuir, P. (1999). Differential expression of expansin gene family members during growth and ripening of tomato fruit. *Plant Molecular Biology*, 39(1), 161–169. <https://doi.org/10.1023/a:1006130018931>
28. Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (Eds.). (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

29. Campbell, A. D., Huysamer, M., Stotz, H. U., Greve, L. C., & Labavitch, J. M. (1990). Comparison of ripening processes in intact tomato fruit and excised pericarp discs. *Plant Physiology*, 94(4), 1582–1589. <https://doi.org/10.1104/pp.94.4.1582>
30. Campos, C. A. B., Fernandes, P. D., Gheyi, H. R., Blanco, F. F., Gonçalves, C. B., & Campos, S. A. F. (2006). Yield and fruit quality of industrial tomato under saline irrigation. *Scientia Agricola*, 63(2), 146–152. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200006>
31. Causse, M., Giovannoni, J., Bouzayen, M., & Zouine, M. (Eds.). (2016). The tomato genome. *Compendium of Plant Genomes*. Springer International Publishing.
32. Chandel, N. S. (2021). Carbohydrate metabolism. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(10), a040568. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a040568>
33. Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & Nagpal, A. K. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), 2833–2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
34. Chen, Y.-F., Randlett, M. D., Findell, J. L., & Schaller, G. E. (2002). Localization of the ethylene receptor ETR1 to the endoplasmic reticulum of Arabidopsis. *Journal of Biological Chemistry*, 277(22), 19861–19866. <https://doi.org/10.1074/jbc.M201286200>
35. Chevalier, A. (1941). L'origine et la diffusion des plantes cultivées. *Revue de Botanique Appliquée et d'Agriculture Tropicale*.
36. Clinton, S. K. (1998). Lycopene: Chemistry, biology, and implications for human health and disease. *Nutrition Reviews*, 56(2), 35–51. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1998.tb01691.x>
37. Cory, H., Passarelli, S., Szeto, J., Tamez, M., & Mattei, J. (2018). The role of polyphenols in human health and food systems. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 479–508. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012844>
38. Cosgrove, D. J. (2022). Building an extensible cell wall. *Plant Physiology*, 189(3), 179–191. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac184>
39. Coyago-Cruz, E., Corell, M., Moriana, A., Hernanz, D., Benítez-González, A. M., Stinco, C. M., & Meléndez-Martínez, A. J. (2018). Antioxidants (carotenoids and phenolics) profile of cherry tomatoes as influenced by deficit irrigation, ripening and cluster. *Food Chemistry*, 240, 870–884. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.028>
40. Crosby, A. W. (2003). The Columbian exchange: Biological and cultural consequences of 1492 (30th anniversary ed.). Praeger.

41. Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N. (2009). Dietary phenolics: Chemistry, bioavailability and effects on health. *Natural Product Reports*, 26(8), 1054–1055. <https://doi.org/10.1039/b802662a>
42. D'Alessandro, S., & Havaux, M. (2019). Sensing β -carotene oxidation in photosystem II to master plant stress tolerance. *New Phytologist*, 223(4), 1776–1783. <https://doi.org/10.1111/nph.15924>
43. Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313–7352. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>
44. Davies, J. N., & Hobson, G. E. (1981). The constituents of tomato fruit: The influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 15(3), 205–280. <https://doi.org/10.1080/10408398109527317>
45. Dickinson, A. J., Lehner, K., Mi, J., Jia, K. P., Mijar, M., Dinneny, J., Al-Babili, S., & Benfey, P. N. (2019). β -Cyclocitral is a conserved root growth regulator. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(21), 10563–10567. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821445116>
46. Diretto, G., Frusciante, S., Fabbri, C., Schauer, N., Busta, L., Wang, Z., Matas, A. J., Fiore, A., Rose, J. K. C., Fernie, A. R., Jetter, R., Mattei, B., Giovannoni, J., & Giuliano, G. (2020). Manipulation of β -carotene levels in tomato fruits results in increased ABA content and extended shelf life. *Plant Biotechnology Journal*, 18(5), 1185–1199. <https://doi.org/10.1111/pbi.13283>
47. Djoudi, Z. (2016). Contribution à l'étude de lycopène de tomate : Extraction et évaluation de son effet antioxydant sur une huile alimentaire [Mémoire de Master Académique]. Université M'hamed Bouguerra Boumerdès.
48. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28, 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
49. Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G., & Grolier, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 369–382. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1370>
50. Dupont, F., & Guignard, J.-L. (2012). *Botanique : Les familles de plantes* (15e éd.). Elsevier Masson.

51. Elayyat, S. M. S. (2015). Concentration and temperature dependence of viscosity in mode-coupling theory of binary mixture of water and phenol [Master's thesis]. An-Najah National University, Palestine.
52. Faci, M., & Bedjaoui, H. (2023). Agrobiodiversity in the El Oued site (Algeria). MedAgriFoodResilience. <https://www.medagrifood.eu/wp-content/uploads/2023/11/D2.2-List-of-cultivated-species-and-varieties.pdf>
53. Fenn, M. A., & Giovannoni, J. J. (2021). Phytohormones in fruit development and maturation. *The Plant Journal*, 105(2), 446–458. <https://doi.org/10.1111/tpj.15112>
54. Fischer, R. L., & Bennett, A. B. (1991). Role of cell wall hydrolases in fruit ripening. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42, 675–703. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.003331>
55. FAO & WHO. (2019). Sustainable healthy diets: Guiding principles. Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. <https://doi.org/10.4060/ca6640en>
56. Fraser, P. D., Truesdale, M. R., Bird, C. R., Schuch, W., & Bramley, P. M. (1994). Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development: Evidence for tissue-specific gene expression. *Plant Physiology*, 105(1), 405–413. <https://doi.org/10.1104/pp.105.1.405>
57. Gapper, N. E., McQuinn, R. P., & Giovannoni, J. J. (2013). Molecular and genetic regulation of fruit ripening. *Plant Molecular Biology*, 82(6), 575–591. <https://doi.org/10.1007/s11103-013-0050-3>
58. Génard, M., Baldazzi, V., & Gibon, Y. (2010). Metabolic models to improve understanding and prediction of sugar content in tomato. In J. Labavitch (Ed.), *Advances in plant cell biology*. Academic Press.
59. Gillasp, G., Ben-David, H., & Gruissem, W. (1993). Fruits: A developmental perspective. *The Plant Cell*, 5(10), 1439–1451. <https://doi.org/10.1105/tpc.5.10.1439>
60. Giordano, L. B. (2000). Tomato crop management and fruit quality. *Horticultura Brasileira*, 18, 3–7.
61. Giovannoni, J. J. (2001). Molecular biology of fruit maturation and ripening. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52, 725–749. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.725>
62. Giovannoni, J. J. (2004). Genetic regulation of fruit development and ripening. *The Plant Cell*, 16(Suppl), S170–S180. <https://doi.org/10.1105/tpc.019158>

63. Giovannoni, J., Nguyen, C., Ampofo, B., Zhong, S., & Fei, Z. (2017). The epigenome and transcriptional dynamics of fruit ripening. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 61–84. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-040906>
64. Guezoul, O., Chenchouni, H., Sekour, M., Ababsa, L., Souttou, K., & Doumandji, S. (2013). An avifaunal survey of mesic manmade ecosystems “Oases” in Algerian hot-hyperarid lands. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.09.002>
65. Gupta, A., & Bhatt, R. (2022). Reflectance based non-destructive determination of colour and ripeness of tomato fruits. *Journal of Plant Biology*, 65, 89–101. <https://doi.org/10.1007/s12374-022-09347-8>
66. Gupta, R., Kopec, R. E., Schwartz, S. J., & Balasubramaniam, V. M. (2011). Combined pressure-temperature effects on carotenoid retention and bioaccessibility in tomato juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(14), 7808–7817. <https://doi.org/10.1021/jf200575t>
67. Harborne, J. B., & Williams, C. A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*, 55(6), 505–512. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00235-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00235-1)
68. Helyes, L., Pék, Z., & Lugasi, A. (2006). Tomato fruit quality and content depend on stage of maturity. *HortScience*, 41(6), 1400–1401.
69. Heuvelink, E. (Ed.). (2018). *Tomatoes* (2nd ed., Crop Production Science in Horticulture, Vol. 13). CABI Publishing.
70. Holt, C. B. (1970). Measurement of tomato firmness with a universal testing machine. *Journal of Texture Studies*, 1(4), 491–501. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1970.tb00747.x>
71. Hong, T. L., & Tsou, S. C. S. (1998). Determination of tomato quality by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6(A), 321–324. <https://doi.org/10.1255/jnirs.215>
72. Hoover, R. (2021). Composition, molecular structure, properties, and modification of legume starches: A review. *Cereal Chemistry*, 98(1), 86–104. <https://doi.org/10.1002/cche.10355>
73. Ibrahim, M. S., Muhammad, M. H., Zage, A. U., Usman, M. T., & Garba, K. M. (2026). The therapeutic potential of beta-carotene: A short review of current evidence. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 15(3), 1212–1230. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18887037>
74. Ignat, I., Volf, I., & Popa, V. I. (2011). A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 126(4), 1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026>

75. ISO. (1991). Fruit and vegetable products — Determination of pH (ISO 1842:1991). International Organization for Standardization.
76. Jackman, R. L., Marangoni, A. G., & Stanley, D. W. (1990). Measurement of tomato fruit firmness. *HortScience*, 25(7), 781–783. <https://doi.org/10.21273/hortsci.25.7.781>
77. Jenkins, J. (1948). The origin of the cultivated tomato. *Economic Botany*, 2(4), 379–392. <https://doi.org/10.1007/BF02859492>
78. Kader, A. A. (Ed.). (2002). Postharvest technology of horticultural crops (3rd ed.). University of California, Agriculture and Natural Resources.
79. Kai, W., Xu, L., Jiang, G., Sun, L., Shah Jahan, M., Wang, Q., & Luo, Y. (2019). Functional analysis of genes during tomato fruit set. *Scientific Reports*, 9, Article 16283. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52948-2>
80. Kaur, C., Walia, S., Nagal, S., Singh, J., & Singh, B. B. (2012). Functional quality and antioxidant composition of selected tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars. *LWT – Food Science and Technology*, 46(1), 249–253. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.009>
81. Khornti, S. (2023). Multifaceted role of carbohydrates in plants. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 11(3), 1000278.
82. Kimura, S., & Sinha, N. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*): A model fruit-bearing crop. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2008(11), pdb.emo105. <https://doi.org/10.1101/pdb.emo105>
83. Kumar, N., & Goel, N. (2019). An overview of plant phenolics and their involvement in abiotic stress tolerance. *Plant Signaling & Behavior*, 14(4), 1–8. <https://doi.org/10.3390/stresses3030040>
84. Kurina, A. B., Solovieva, A. E., Khrapalova, I. A., & Artemyeva, A. M. (2021). Biochemical composition of tomato fruits of various colors. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektzii*, 25(5), 514–527. <https://doi.org/10.18699/VJ21.058>
85. Labatut, A. (1982). Histoire de l'introduction des cultures maraîchères en Afrique du Nord (p. 45–48). Presses Universitaires de France.
86. Lekhouimes, S., Rahal, B. F., Tercha, A., & Omane, H. (2022). Évaluation de la qualité nutritionnelle de la tomate séchée (variété cultivée dans la wilaya de Oued Souf) [Mémoire de master]. Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
87. Lenucci, M. S., Cadinu, D., Taurino, M., Piro, G., & Dalessandro, G. (2006). Antioxidant composition in cherry and high-pigment tomato cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(8), 2606–2613. <https://doi.org/10.1021/jf052565y>

88. Leonardi, C., Baille, A., & Guichard, S. (2000). Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments. *Scientia Horticulturae*, 84(3–4), 297–307. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00130-2)
89. Liang, M. H., & Jiang, J. G. (2017). Analysis of carotenogenic genes promoters and WRKY transcription factors in response to salt stress in *Dunaliella bardawil*. *Scientific Reports*, 7, 37025. <https://doi.org/10.1038/srep37025>
90. Lima, G. P. P., Gómez, H. A. G., Seabra Junior, S., Maraschin, M., Tecchio, M. A., & Borges, C. V. (2022). Functional and nutraceutical compounds of tomatoes as affected by agronomic practices, postharvest management, and processing methods: A mini review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 868492. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.868492>
91. Lurie, S., & Crisosto, C. H. (2005). Chilling injury in peach and nectarine. *Postharvest Biology and Technology*, 37(3), 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.04.012>
92. Mapelli, S., Frova, C., Torti, G., & Soressi, G. P. (1978). Relationship between set, development and activities of growth regulators in tomato fruits. *Plant and Cell Physiology*, 19(7), 1281–1288. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a075721>
93. Martí, R., Roselló, S., & Cebolla-Cornejo, J. (2016). Tomato as a source of carotenoids and polyphenols targeted to cancer prevention. *Cancers*, 8(6), 58. <https://doi.org/10.3390/cancers8060058>
94. Matkowski, A., & Piotrowska, M. (2006). Antioxidant and free radical scavenging activities of some medicinal plants from the Lamiaceae. *Fitoterapia*, 77(5), 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2006.04.004>
95. Melo, P. C. T. (1989). Melhoramento genético do tomateiro. Asgrow do Brasil Sementes.
96. Molesini, B., Rotino, G. L., Franceschetti, M., & Pandolfini, T. (2020). Fruit development: Current knowledge and future directions. *Plants*, 9(11), 1571. <https://doi.org/10.3390/plants9111571>
97. Mou, H., Sun, M., Liao, J., Cheng, Y., & Xie, J. (2020). Carotenoids and plant immunity. *Frontiers in Plant Science*, 11, 571596. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.571596>
98. Mokhnane, T., Adjlane, S., & Khiari, R. (2023). Agricultural development as a mechanism for protecting borders: Oued Souf region as a model. *Journal Algérien des Régions Arides*, 16(1), 113–123. <https://asjp.cerist.dz/en/article/229473>
99. Naczk, M., & Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41(5), 1523–1542. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.04.002>

100. Nami, M., Zarabi, A., Seyfieddik, M., Khan, U. M., Hasan, M., Salam, Z. O., Kaplan, D. N., Ozdemir, B., Rad, J. S., Alshehri, M. M., & Kumar, M. (2021). Lycopene: Food sources, biological activities, and human health benefits. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, Article 2713511. <https://doi.org/10.1155/2021/2713511>
101. Nawaz, A. F., Gargiulo, S., Pichierri, A., & Casolo, V. (2025). Exploring the role of non-structural carbohydrates (NSCs) under abiotic stresses on woody plants: A comprehensive review. *Plants*, 14(3), 328. <https://doi.org/10.3390/plants14030328>
102. Nour, V., Trandafir, I., & Ionica, M. E. (2013). Antioxidant compounds, mineral content and antioxidant activity of several tomato cultivars grown in Southwestern Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 41(1), 136–142. <https://doi.org/10.15835/nbha4119026>
103. Okiror, P., Lejju, J. B., Bahati, J., Rugunda, G. K., & Sebuuwufu, C. I. (2017). Maturity indices for tomato (*Solanum lycopersicum* L.), cv. Ghalia 281 in central Uganda. *African Journal of Agricultural Research*, 12(14), 1196–1203. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12094>
104. Pavlova, T., Stamatovska, V., Dimov, I., Nakov, G., & Kalevska, T. (2018). Carotenoids in foods. *International Conference on Technics, Technologies and Education (ICTTE)*, 246–250. <https://doi.org/10.15547/ictte.2018.06.006>
105. Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., & Ahmad, S. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopenes chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919–929. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657160>
106. Preiss, J. (2020). Plant starch synthesis. In R. F. Tester & J. Karkalas (Eds.), *Starch: Chemistry and technology* (pp. 83–134). Elsevier.
107. Quezada, E. T., Gandini-Taveras, R. J., & Perlaza-Cruz, S. (2022). Basic tomato (*Lycopersicon esculentum*) physiology and morphology (Publication SPES-508P). Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech. https://www.pubs.ext.vt.edu/content/dam/pubs_ext_vt_edu/SPES/spes-508/SPES-508.pdf
108. Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., & Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
109. Rao, A. V., & Agarwal, S. (2000). Role of antioxidant lycopene in cancer and heart disease. *Journal of the American College of Nutrition*, 19(5), 563–569. <https://doi.org/10.1080/07315724.2000.10718953>
110. Rodriguez-Amaya, D. B. (2001). *A guide to carotenoid analysis in foods*. ILSI Press.

111. Rosa-Martínez, E., Bovy, A., Plazas, M., Tikunov, Y., Prohens, J., & Pereira-Dias, L. (2023). Genetics and breeding of phenolic content in tomato, eggplant and pepper fruits. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1135237. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1135237>
112. Rose, J. C., & Bennett, A. B. (1999). Cooperative disassembly of the cellulose-xyloglucan network of plant cell walls: Parallels between cell expansion and fruit ripening. *Trends in Plant Science*, 4(5), 176–183. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(99\)01405-3](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(99)01405-3)
113. Saibi, H., Semmar, A., Mesbah, M., & Ehara, S. (2009). Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer, northeastern part of the Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences*, 2, 83–93. <https://doi.org/10.1007/s12517-008-0021-1>
114. Sakata, W. M., & Sora, S. A. (2022). Management of some common insect pests and diseases of tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 28(4), 315–329.
115. Salehi, B., Sharifi-Rad, R., Sharopov, F., Namiesnik, J., Roointan, A., Kamle, M., Kumar, P., Martins, N., & Sharifi-Rad, J. (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health. *Nutrition*, 62, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.01.012>
116. Samtiya, M., Aluko, R. E., Dhewa, T., & Moreno-Rojas, J. M. (2021). Potential health benefits of plant food-derived bioactive components: An overview. *Foods*, 10(4), 839. <https://doi.org/10.3390/foods10040839>
117. Sass-Kiss, A., Kiss, J., Milotay, P., Kerek, M. M., & Toth-Markus, M. (2005). Differences in anthocyanin and carotenoid content of fruits and vegetables. *Food Research International*, 38(8–9), 1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.001>
118. Sathasivam, R., & Ki, J.-S. (2018). A review of the biological activities of microalgal carotenoids and their potential use in healthcare and cosmetic industries. *Marine Drugs*, 16(1), 26. <https://doi.org/10.3390/md16010026>
119. Sathya, M., Sumathi, P., & Joel, A. J. (2014). A simple and rapid screening technique for grain β -carotene content in pearl millet through spectrophotometric method. *African Journal of Agricultural Research*, 9(5), 572–576. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.8296>
120. Sattar, S., Iqbal, A., Parveen, A., Fatima, E., Samdani, A., Fatima, H., Iqbal, M. S., & Wajid, M. (2024). Tomatoes unveiled: A comprehensive exploration from cultivation to culinary and nutritional significance. *Qeios*. <https://doi.org/10.32388/CP4Z4W.2>
121. Schaefer, H. M., & Schaefer, V. (2007). The evolution of visual fruit signals: Concepts and constraints. *Integrative and Comparative Biology*, 47(2), 169–176. <https://doi.org/10.1093/icb/icm012>

122. Schönherr, J., & Bukovac, M. J. (1972). Ion exchange properties of isolated tomato fruit cuticular membrane: Exchange capacity, nature of fixed charges and cation selectivity. *Planta*, 109, 73–93. <https://doi.org/10.1007/BF00385454>
123. Seifu, D., Assefa, F., & Abay, S. M. (2012). Medicinal plants as antioxidant agents: Understanding their mechanism of action and therapeutic efficacy. In A. Capasso (Ed.), *Medicinal plants as antioxidant agents* (p. 99). Research Signpost.
124. Serrani, J. C., Sanjuán, R., Ruiz-Rivero, O., Fos, M., & García-Martínez, J. L. (2007). Gibberellin regulation of fruit set and growth in tomato. *Plant Physiology*, 145(1), 246–257. <https://doi.org/10.1104/pp.107.098335>
125. Seymour, G. B., Chapman, N. H., Chew, B. L., & Roberts, J. A. (2013). Regulation of ripening and opportunities for its manipulation in tomato and other fruits. *Plant Biotechnology Journal*, 11(3), 269–278. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00738.x>
126. Seymour, G. B., Østergaard, L., Chapman, N. H., Knapp, S., & Martin, C. (2013). Fruit development and ripening. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 219–241. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120057>
127. Shafe, M. O., Gumede, N. M., Nyakudya, T. T., & Chivandi, E. (2024). Lycopene: A potent antioxidant with multiple health benefits. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2024, Article 6252426. <https://doi.org/10.1155/2024/6252426>
128. Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Che Man, H., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
129. Shibko, S., Koivistoinen, P., Tratyneck, C., Hall, N., & Feidman, L. (1966). A method for the sequential quantitative separation and determination of protein, RNA, DNA, lipid, and glycogen from a single rat liver homogenate or from a subcellular fraction. *Analytical Biochemistry*, 19, 415–428. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(67\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0003-2697(67)90167-4)
130. Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–158.
131. Skolik, P., Morais, C. L. M., Martin, F. L., & McAinsh, M. R. (2019). Determination of developmental and ripening stages of whole tomato fruit using portable infrared spectroscopy and chemometrics. *BMC Plant Biology*, 19, 236. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1852-5>
132. Slimestad, R., Fossen, T., & Verheul, M. J. (2008). The flavonoids of tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(7), 2436–2441. <https://doi.org/10.1021/jf073434n>

133. Smajlagić, A., Srbović, M., Huremović, M., Pehlić, E., Ademović, Z., Kozarević, E.-Č., Ibišević, M., & Siočić, J. (2021). Isolation and identification of beta-carotene from carrots. *Open Journal of Applied Sciences*, 14(11), 2996–3003. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2024.1411196>
134. Smith, A. F. (1994). *The Tomato in America: Early History, Culture, and Cookery*. Columbia, SC: University of South Carolina Press.
135. Souid, A. A., & Khossa, S. (2025). Évaluation ethnopharmacologique dans la région d'El Oued (Algérie), formulation et efficacité d'une pommade à base des plantes pour le traitement des brûlures [Ethnopharmacological evaluation in the El Oued region (Algeria), formulation and efficacy of a plant-based ointment for the treatment of burns] (Unpublished master's thesis). Université Echahid Hamma Lakhdar-El OUED.
136. Spichiger, R. E., Savolainen, V., Figeat, M., & Jeanmonod, D. (2004). *Botanique systématique des plantes à fleurs : Une approche phylogénétique nouvelle des angiospermes des régions tempérées et tropicales* (3e éd.). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
137. Stahl, W., & Sies, H. (2005). Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Basis of Disease*, 1740(2), 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.12.006>
138. Swamy, K. R. M. (2023). Origin, distribution, taxonomy, botanical description, genetic diversity and breeding of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Development Research*, 13(04), 62364–62387. <https://doi.org/10.37118/ijdr.26502.04.2023>
139. Swartzberg, D., German, R., & Granot, D. (2011). Relationship between hexokinase and cytokinin in the regulation of leaf senescence and seed germination. *Plant Biology*, 13(3), 439–444. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2010.00397.x>
140. Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
141. Tharanathan, R. N., Muralikrishna, G., Salimath, P. V., & Raghavendra Rao, M. R. (1987). Plant carbohydrates—An overview. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Plant Sciences)*, 97(2), 81–155. <https://doi.org/10.1007/BF03053322>
142. Toivonen, P. M. A., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.004>
143. Tomas-Barberan, F. A., & Espin, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 853–876. <https://doi.org/10.1002/jsfa.885>

144. Torres-Montilla, S., & Rodriguez-Concepcion, M. (2021). Making extra room for carotenoids in plant cells: New opportunities for biofortification. *Progress in Lipid Research*, 84, 101128. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2021.101128>
145. Trouvelot, S., Héloir, M. C., Poinssot, B., Gauthier, A., Paris, F., Guillier, C., & Adrian, M. (2014). Carbohydrates in plant immunity and plant protection: Roles and potential application as foliar sprays. *Frontiers in Plant Science*, 5, 592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00592>
146. Tufail, T., Ain, H. B. U., Noreen, S., Ikram, A., Arshad, M. T., & Abdullahi, M. A. (2024). Nutritional benefits of lycopene and beta-carotene: A comprehensive overview. *Food Science & Nutrition*, 12, 8715–8728. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4502>
147. Vishnevetsky, M., Ovadis, M., & Vainstein, A. (1999). Carotenoid sequestration in plants: The role of carotenoid-associated proteins. *Trends in Plant Science*, 4(6), 232–235. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(99\)01414-4](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(99)01414-4)
148. Wakil, W., Brust, G. E., & Perring, T. M. (2018). Tomato and management of associated arthropod pests: Past, present, and future. In W. Wakil, G. E. Brust, & T. M. Perring (Eds.), *Sustainable management of arthropod pests of tomato* (pp. 3–12). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802441-6.00001-2>
149. Wang, F., Kang, S., Du, T. S., & Li, F. (2011). Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. *Agricultural Water Management*, 98(8), 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.004>
150. Zhao, T., He, X., Yan, X., Xi, H., Li, Y., & Yang, X. (2024). Recent advances in the extraction, synthesis, biological activities, and stabilisation strategies for β -carotene: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(4), 2136–2147. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16986>
151. Zhu, F., Wen, W., Cheng, Y., & Fernie, A. R. (2022). The metabolic changes that affect fruit quality during tomato fruit ripening. *Molecular Horticulture*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00024-1>

المواقع الالكترونية:

1. حسني، م. ح. (2015). كل شيء عن زراعة الطماطم. الزراعة نور الحياة، كنانة أونلاين. <https://kenanaonline.com/users/MUHAMEDHOSNY/posts/726653>
2. يومية الاتحاد الجزائرية. (2024، فبراير 19). الوادي: إنتاج حوالي 2,5 مليون قنطار من الطماطم الحقلية برسم الموسم الفلاحي 2024-2023 يومية الاتحاد الجزائرية . Retrieved May 31, 2026, from <https://www.elitihadcom.dz>

3. وكالة الأنباء الجزائرية. (2022، فبراير 9). الوادي: إنتاج حوالي ثلاثة ملايين قنطار من الطماطم الحقلية خلال الموسم الفلاحي الجاري. *وكالة الأنباء الجزائرية* (APS). Retrieved May 31, 2026, from <https://www.aps.dz/ar/regions/120992-2022-02-09-09-18-33>
4. Britannica, T. Editors. (2026). Tomato (*Solanum lycopersicum*). In *Encyclopaedia Britannica*. Retrieved May 30, 2026, from <https://www.britannica.com/plant/tomato>
5. Dreamstime. (n.d.). Stade de croissance de la cerise tomate [Vector image]. Retrieved May 30, 2026, from <https://www.dreamstime.com>
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *FAOSTAT: Crops and livestock products* [Database]. FAO. Retrieved May 31, 2026, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
7. Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *Tomato production – UN FAO* [Dataset]. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/tomato-production>
8. Graibeard. (2009, February 6). Tomatoes-Root System-South Garden Bed [صورة فوتوغرافية]. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/8393288@N04/3259393554/>
9. Quelle est cette plante. (n.d.). *Solanum lycopersicum* - Tomate. <http://www.quelleestcetteplante.fr/especes.php?genre=Solanum&variete=lycopersicum>
10. Techno-Science.net. Diffusion de la tomate [خريطة توضيحية]. https://www.techno-science.net/illustration/Definitions/1200px/d/diffusion-de-la-tomate.svg_8c1dfe57fcc4ccc1bfe0ea5ad74514a5.png
11. Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.

الملاحق

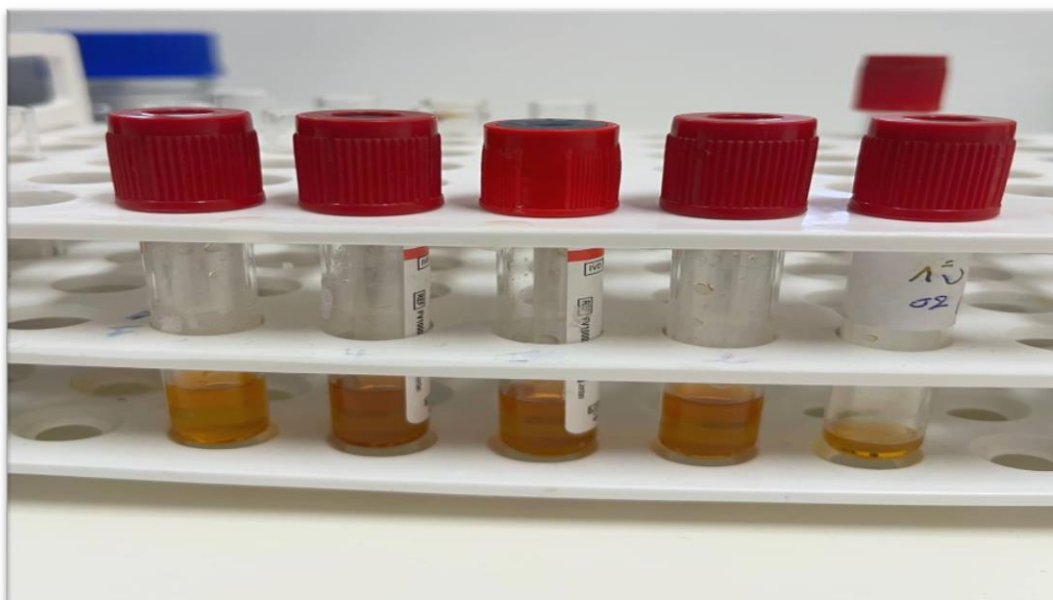
الملحق رقم (01): صور مراحل تحضير العينات والأجهزة المستعملة في الدراسة



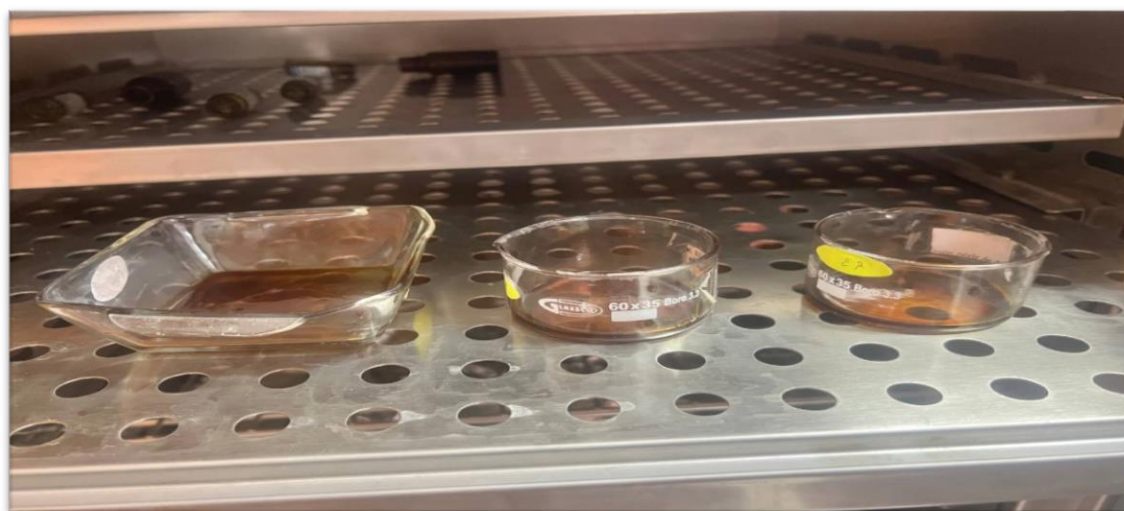
الوثيقة (01): عملية تحضير العينات



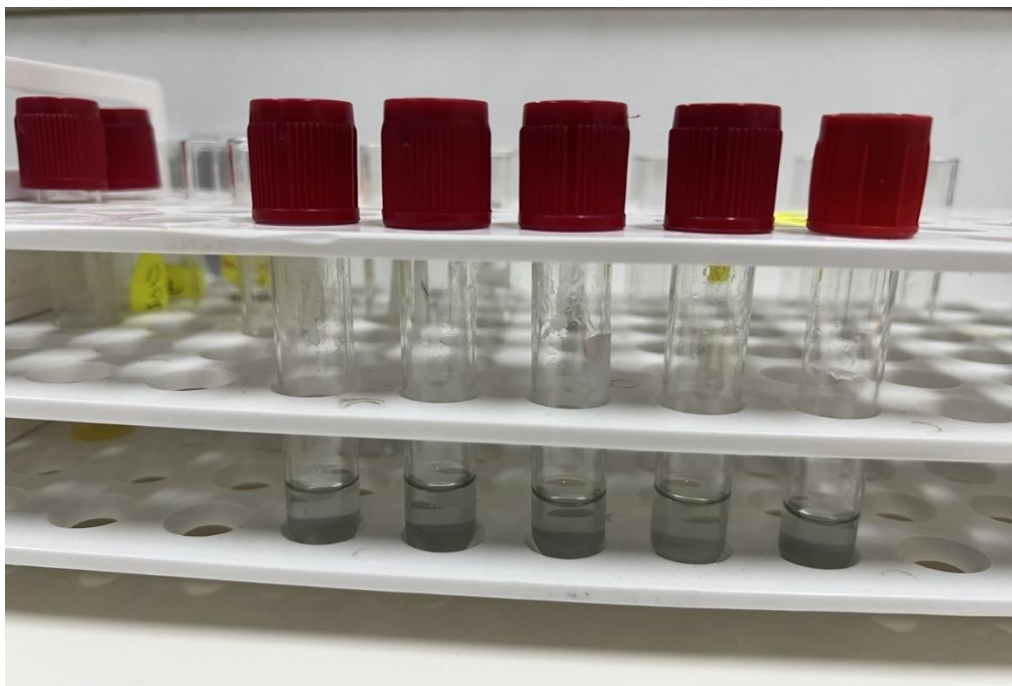
الوثيقة (2): عملية تقطيع الشرائح لقطع متساوية



الوثيقة (03): عملية تقدير الكربوهيدرات.



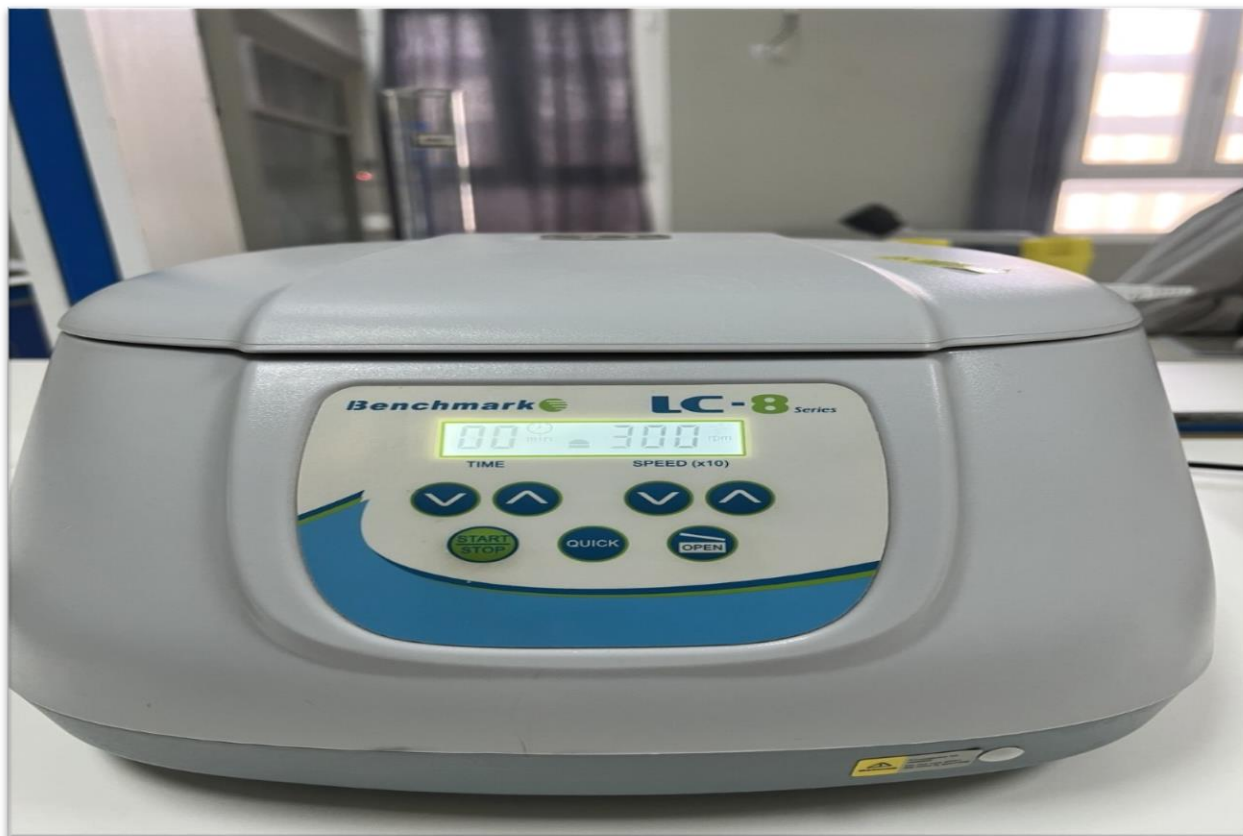
الوثيقة (04): المستخلص الميثانولي.



الوثيقة (05): عملية تقدير الفينولات الكلية.



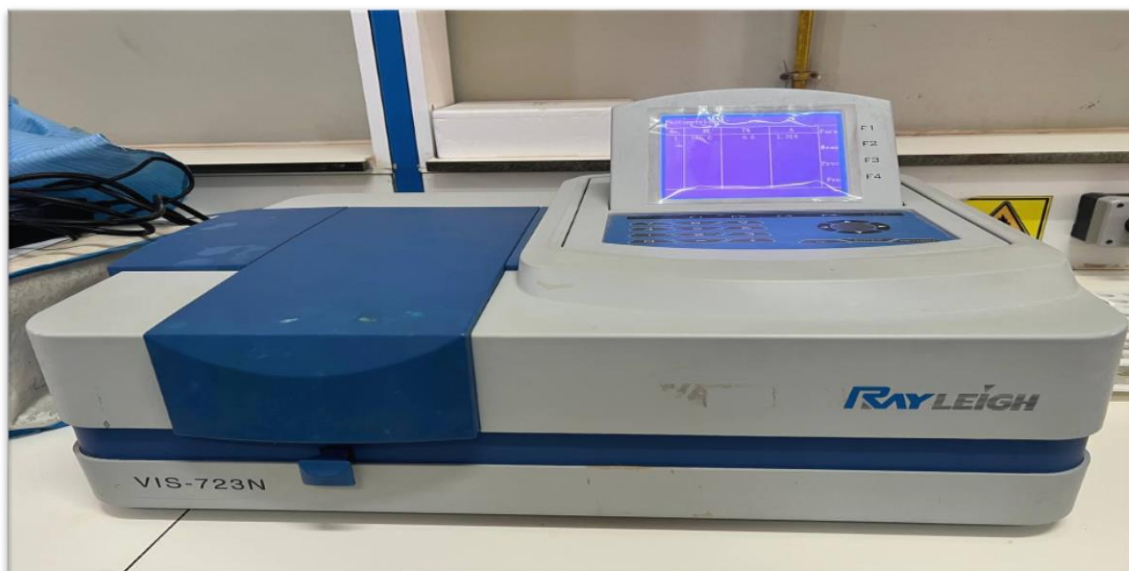
الوثيقة (06): الجهاز الدوار (vortex).



الوثيقة (07): جهاز الطرد المركزي.



الوثيقة (08): جهاز ph meter.



الوثيقة (09): جهاز المطياف الضوئي

الملحق رقم (02): نتائج تحليل التباين (ANOVA) للخصائص الفيزيائية والكيميائية والمركبات الحيوية في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم

الجدول (01): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى الرطوبة في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	1.2101	0.6051	0.6872	0.5386
Error	6	5.2829	0.8805		
Corrected Total	8	6.4930			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (02): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى المادة الجافة في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	1.2101	0.6051	0.6872	0.539
Error	6	5.2829	0.8805		
Corrected Total	8	6.4930			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (03): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لصلابة ثمار الطماطم في مختلف مراحل النضج.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	73.3532	36.6766	257.3585	< 0.0001
Error	6	0.8551	0.1425		
Corrected Total	8	74.2082			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (04): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لقيم الأس الهيدروجيني (pH) في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	0.1440	0.0720	43.2000	< 0.0001
Error	12	0.0200	0.0017		
Corrected Total	14	0.1640			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (05): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى الكربوهيدرات في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	464.7963	232.3982	107.6513	< 0.0001
Error	12	25.9057	2.1588		
Corrected Total	14	490.7020			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (06): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى الفينولات الكلية في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	409.7447	204.8723	21.4054	0.0001
Error	12	114.8528	9.5711		
Corrected Total	14	524.5975			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (07): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى الليكوبين في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	18230.6369	9115.3185	68.3999	< 0.0001
Error	12	1599.1803	133.2650		
Corrected Total	14	19829.8173			

Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (08): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى البيتا-كاروتين في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	103.9593	51.9796	10.5801	0.0022
Error	12	58.9556	4.9130		
Corrected Total	14	162.9148			

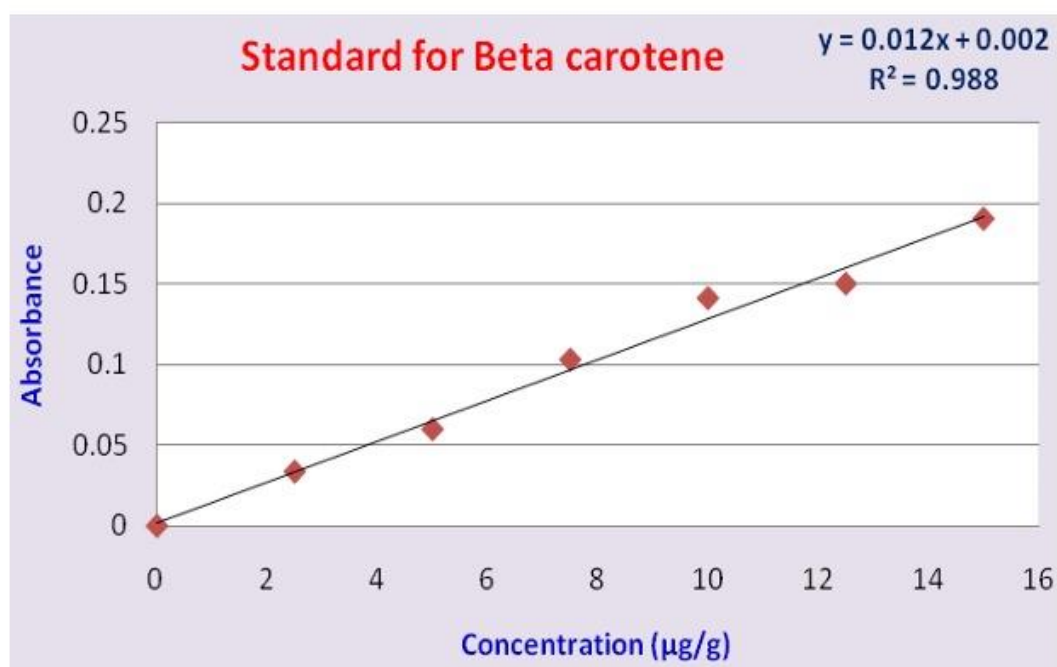
Computed against model $Y=Mean(Y)$

الجدول (09): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لمحتوى فيتامين أ في مختلف مراحل نضج ثمار الطماطم.

Analysis of variance:

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	2	7248.2995	3624.1497	10.5801	0.0022
Error	12	4110.5287	342.5441		
Corrected Total	14	11358.8282			

Computed against model $Y = \text{Mean}(Y)$



الوثيقة 01: منحنى قياسى لبىتا-كاروتين (Sathya et al., 2014)