جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة ميسان – كلية العلوم

قسم علوم الحياة

"دراسة تحليلية شاملة للفطريات الممتصة للإشعاع المؤين: الخصائص، آليات التكيف والتطبيقات المستقبلية"

بحث مقدم إلى مجلس كلية العلوم في جامعة ميسان كجزء من متطلبات الحصول على درجة البكالوريوس في علوم الحياة

تـــــقدمت بـــــه الطـــالبة:

نور الهدى جمعة ضمد جابر

بإشراف:

م.م. بتول عبد الزهرة كاطع

١٤٤٦هـ

٢٠٢٥م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَيَسْأَلُونَكَ عَنِ الرُّوحِ قُلِ الرُّوحُ مِنْ أَمْرِ رَبِّي وَمَا أُوتِيتُمْ مِنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا﴾

صَدَقَ اللَّهُ الْعَلِيُّ الْعَظِيمُ

[الْإِسْرَاءِ الْآيَةِ: ٨٥]

الاهداء

إِلَى قَائِدِيَّ المُقَاوَمَةِ ....

إِلَى الشَّهِيدَيْنِ البَطَلَيْنِ ....

السَّيِّدِ حَسَنَ نَصْرِ اللهِ وَالسَّيِّدِ هَاشِمَ صَفِي الدِّينِ

اللَّذَيْنِ ارْتَقَيَا إِلَى سَاحَةِ الخُلُودِ

وَوَاصَلَا مَسِيرَةَ التَّضْحِيَةِ حَتَّى النَّصْرِ أَوِ الشَّهَادَةِ

وَإِلَى جَمِيعِ الشُّهَدَاءِ الأَبْرَارِ الَّذِينَ سَطَّرُوا بِدِمَائِهِمْ مَلْحَمَةً لَا

تُنْسَى فِدَاءً لِلْوَطَنِ وَالعَقِيدَةِ وَالكَرَامَةِ

إِلَيْكُمْ يَا مَنْ بَذَلْتُمْ أَرْوَاحَكُمْ فِدَاءً لِلْحَقِّ وَالكَرَامَةِ يَا مَنْ رَسَمْتُمْ بِدِمَائِكُمُ الزَّكِيَّةِ طَرِيقَ العِزَّةِ وَالنَّصْرِ

إِلَيْكُمْ يَا مَنْ كُنْتُمْ نِبْرَاسًا يُضِيءُ لَنَا دُرُوبَ الحُرِّيَّةِ

إِلَيْكُمْ يَا مَنْ سَطَّرْتُمْ أَرْوَعَ مَلَاحِمِ البَطُولَةِ وَالفِدَاءِ

إِلَيْكُمْ يَا شُهَدَاءَ الحَقِّ يَا قَادَةَ النَّصْرِ يَا مَنْ كُنْتُمْ وَمَا زِلْتُمْ فِي قُلُوبِنَا أَحْيَاءَ

إِلَيْكُمْ نُهْدِي جَهْدَنَا هَذَا جَهْدٌ لَا يُفِيكُمْ حَقَّكُمْ وَلَا يُعَبِّرُ عَنْ مَدَى فَخْرِنَا وَاعْتِزَازِنَا بِكُمْ وَلَكِنَّهُ جَهْدٌ نَبَعَ مِنْ قُلُوبٍ مُؤْمِنَةٍ بِكُمْ وَبِقَضِيَّتِكُمْ وَبِنَصْرِكُمُ القَادِمِ.

الشكر والتقدير

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ الَّذِي بِفَضْلِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ وَبِتَوْفِيقِهِ تَتَحَقَّقُ الْغَايَاتُ وَأُصَلِّي وَأُسَلِّمُ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ خَاتَمِ الْأَنْبِيَاءِ وَالْمُرْسَلِينَ وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ أَجْمَعِينَ.

أَمَّا بَعْدُ:

أُولِي كَلِمَاتِ الشُّكْرِ الْجَزِيلِ وَالْعُرْفَانِ وَعَظِيمِ الامتنان لِلَّهِ عَزَّ وَجَلَّ الَّذِي مَنَّ عَلَيَّ بِنِعْمَةِ الْعَقْلِ وَالصِّحَّةِ وَأَعَانَنِي بِإِذْنِهِ لِتَكْمِيلِ هَذَا الْبَحْثِ وَالَّذِي لَوْلَا كَرَمُهُ وَفَضْلُهُ مَا كُنْتُ لِأُصِلَ لِهَذَا الْإِنْجَازِ فَلَهُ الْحَمْدُ أَوَّلًا وَآخِرًا ظَاهِرًا وَبَاطِنًا

ثُمَّ أَشْكُرُ وَالِدَتِي وَوَالِدِي حَنَانَيْ حَيَاتِي وَسَنَدِي فِي كُلِّ خُطْوَةٍ نُورَ حَيَاتِي اللَّذَيْنِ ضَحَّيَا بِوَقْتِهِمَا وَرَاحَتِهِمَا مِنْ أَجْلِي وَسَهَّرَا لَيَالِيَ طَوِيلَةً دَعْمًا وَتَشْجِيعًا فَجَزَاهُمَا اللَّهُ خَيْرَ الْجَزَاءِ وَأَطَالَ فِي عُمُرِهِمَا وَرَدَّ لَهُمَا جُزْءًا مِنْ جَمِيلِهِمَا

وَلَا يُفُوتُنِي أَنْ أَتَوَجَّهَ بِالشُّكْرِ الْجَزِيلِ إِلَى مُشْرِفَتِي الْفَاضِلَةِ الْسُّتُ بُتُولَ عَبْدِ الزَّهْرَةِ كَاطِعُ الَّتِي لَمْ تَبْخَلْ عَلَيَّ بِتَوْجِيهَاتِهَا الْقَيِّمَةِ وَرُؤْيَتِهَا الْعِلْمِيَّةِ إِلَيْهَا أَتَقَدَّمُ بِخَالِصِ الشُّكْرِ وَالتَّقْدِيرِ عَلَى تَوْجِيهَاتِهَا السَّدِيدَةِ وَنَصَائِحِهَا الْقَيِّمَةِ وَصَبْرِهَا الَّذِي لَا يَلِينُ

وَلَا بُدَّ لَنَا وَنَحْنُ نَخْطُو خُطُوَاتِنَا الْأَخِيرَةَ فِي الْحَيَاةِ الْجَامِعِيَّةِ مِنْ وَقْفَةٍ نَعُودُ بِهَا إِلَى أَعْوَامٍ قَضَيْنَاهَا فِي رِحَابِ الْجَامِعَةِ مَعَ أَسَاتِذَتِنَا الْكِرَامِ الَّذِينَ قَدَّمُوا لَنَا الْكَثِيرَ بَاذِلِينَ بِذَلِكَ جُهُودًا كَبِيرَةً فِي بِنَاءِ جِيلِ الْغَدِ لِتُبْعَثَ الْأُمَّةُ مِنْ جَدِيدٍ

وَلَا أَنْسَى كُلَّ مَنْ وَقَفَ إِلَى جَانِبِي فِي رِحْلَتِي الْحَيَاتِيَّةِ وَالْعِلْمِيَّةِ وَسَانَدَنِي فِي مَسِيرَتِي: الَّذِينَ شَجَّعُونِي بِكَلِمَاتِهِمْ وَوَقْفَتِهِمُ الْمَعْنَوِيَّةِ فَلَكُمْ مِنِّي أَسْمَى آيَاتِ التَّقْدِيرِ وَجَزَاكُمُ اللَّهُ خَيْرَ الْجَزَاءِ

أَسْأَلُ اللَّهَ أَنْ يَتَقَبَّلَ هَذَا الْعَمَلَ خَالِصًا لِوَجْهِهِ الْكَرِيمِ وَأَنْ يَنْفَعَ بِهِ وَأَنْ يَجْعَلَهُ لَبِنَةً فِي بِنَاءِ الْعِلْمِ النَّافِعِ وَأَنْ يُوَفِّقَنَا جَمِيعًا لِمَا يُحِبُّهُ وَيَرْضَاهُ

وَالْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ

اقـــرار المشرفة

أَقِرُّ أَنَا الْسُّتُ بُتُولُ عَبْدِ الزَّهْرَةِ كَاطِعُ بِصِفَتِي المُشْرِفَةَ عَلَى بَحْثِ التَّخْرُّجِ المُقَدَّمِ مِنَ الطَّالِبَةِ **(نُورُ الهُدَى جُمْعَةُ ضَمْدِ جَابِر)** بعنوان **[دراسة تحليلية شاملة للفطريات الممتصة للإشعاع المؤين: الخصائص، آليات التكيف والتطبيقات المستقبلية]** أَنَّ الطَّالِبَةَ قَدْ أَتَمَّتْ مُتَطَلَّبَاتِ البَحْثِ بِنَجَاحٍ وَأَنَّ البَحْثَ يَسْتَوْفِي المَعَايِيرَ الأَكَادِيمِيَّةَ المَطْلُوبَةَ لِلْحُصُولِ عَلَى دَرَجَةِ البَكَالُورِيُوسِ فِي عُلُومِ الحَيَاةِ

لَقَدْ بَذَلَتِ الطَّالِبَةُ جُهْدًا مَلْحُوظًا فِي إِعْدَادِ هَذَا البَحْثِ وَأَظْهَرَتْ كَفَاءَةً عَالِيَةً فِي البَحْثِ وَالتَّحْلِيلِ وَالكِتَابَةِ. وَأَرَى أَنَّ البَحْثَ يُمَثِّلُ إِضَافَةً قِيمَةً إِلَى المَعْرِفَةِ فِي مَجَالِ **(عُلُومِ الحَيَاةِ)**

بِنَاءً عَلَى ذَلِكَ، أُوصِي بِمَنْحِ الطَّالِبَةِ دَرَجَةَ البَكَالُورِيُوسِ فِي **(عُلُومِ الحَيَاة)**

المُشْرِفَةُ: م.م. بُتُولُ عَبْدُ الزَّهْرَةِ كَاطِعُ

التَّوْقِيع :

التَّارِيخُ: / / ٢٠٢٥م

اقرار رئيس قسم علوم الحياة

بِنَاءً عَلَى التَّوصِيَةِ الْمُقَدَّمَةِ مِنْ قَبْلِ الْأُسْتَاذَةِ الْمُشْرِفَةِ **(م.م. بَتُول عَبْدَ الزَّهْرَةِ كَاطِعُ)**، أُحِيلَ هَذَا الْبَحْثُ إِلَى لَجْنَةِ الْمُنَاقَشَةِ لِدِرَاسَةِ وَبَيَانِ الرَّأْيِ فِيهِ.

رَئِيسُ قِسْمِ عُلُومِ الحَيَاةِ: أ.د. صالح حسن جازع

التَّوْقِيعُ:

التَّارِيخُ: / / ٢٠٢٥م

اقرار لجنة المناقشة

نَحْنُ أَعْضَاءُ لَجْنَةِ المُنَاقَشَةِ وَالتَّقْيِيمِ لِرِسَالَةِ البَكَالُورِيُوس، نُقِرُّ بِمَا يَأْتِي :

١. أَنَّ الطَّالِبَةَ **(نُورُ الهُدَى جُمْعَةُ ضَمْدِ جَابِر)** قَدْ قَدَّمَتْ بَحْثًا عِلْمِيًّا عُنْوَانُهُ: **[دراسة تحليلية شاملة للفطريات الممتصة للإشعاع المؤين: الخصائص، آليات التكيف والتطبيقات المستقبلية]** تَحْتَ إِشْرَافِ الْسُّتُ: **بُتُولُ عَبْدِ الزَّهْرَةِ كَاطِعُ**

٢. أَنَّ البَحْثَ قَدِ اكْتَمَلَ بِحَسَبِ الأُسُسِ العِلْمِيَّةِ المُعْتَمَدَةِ وَاسْتَوفَى جَمِيعَ المَتَطَلَّبَاتِ الأَكَادِيمِيَّةِ وَخَلُصَ إِلَى نَتَائِجَ تُسَاهِمُ فِي مَجَالِ عُلُومِ الحَيَاةِ .

٣. أَنَّ اللَّجْنَةَ قَدْ اطَّلَعَتْ عَلَى البَحْثِ وَأَجْرَتْ مُنَاقَشَةً عِلْمِيَّةً مع الطَّالِبَةِ وَقَدْ وَجَدْنَا أَنَّهُ جَدِيرٌ بِالقَبُولِ بِتَقْدِيرٍ ( ).

٤. تُوصِي اللَّجْنَةُ بِمُنَاقَبَةِ الطَّالِبَةِ وَمَنْحِهَا دَرَجَةَ البَكَالُورِيُوس فِي عُلُومِ الحَيَاة، لِتَمَيُّزِ البَحْثِ وَاسْتِحْقَاقِهَا لِهَذِهِ الدَّرَجَةِ .

وَفَّقَ اللَّهُ الجَمِيعَ لِمَا يُحِبُّ وَيَرْضَى .

تَوْقِيعَاتُ أَعْضَاءِ اللَّجْنَةِ :

---

١. عُضْوٌ اللَّجْنَةِ :

التَّوْقِيعُ:

---

٢. عُضْوٌ اللَّجْنَةِ :

التَّوْقِيعُ :

---

٣. رَئِيسُ اللَّجْنَةِ :

التَّوْقِيعُ :

رَئِيسُ قِسْمِ عُلُومِ الحَيَاةِ :

التَّوْقِيعُ :

التَّارِيخُ : / /٢٠٢٥م

خَتْمُ الجَامِعَةِ

المحتويات

المبحث الاول		
ترقيم العناوين	المواضيع	رقم الصفحة
	الـمقـدمة	2_4

المبحث الثاني		
ترقيم العناوين	المواضيع	رقم الصفحة
1.2	الاكتشاف الأولي لهذه الفطريات	6_8
2.2	التـجارب العلمية التي أجـراها العلماء على هذه الفطريات	9_10
3.2	خـصائص هـذه الفطريات	11_12
4.2	الاماكن التي تـوجد فيها هذه الفـطريات	12_14
5.2	التخليق الحيوي للميلانين	14_15
1.5.2	التـوزيـع الإسـتراتيجي للـصبغة	15
2.5.2	آلية عمل الميلانين في امتصاص وتحويل الإشعاع	16
3.5.2	عملية التـخليق الإشــعاعي (Radiosynthesis)	16_17
6.2	آليـة تـحويل الإشــعاع إلى طاقة مفيدة	18
1.6.2	آليـة تحويل الإشـعاع إلى طاقة مفيدة داخــل الخلية الفطرية	18
2.6.2	آليات أخـرى غير الميـلانين تسـاعد على امـتصاص وتحويل الإشعاع	18
3.6.2	التطبيقات المستقبلية لهذه الفطريات	19_24

المبحث الثالث		
ترقيم العناوين	المواضيع	رقم الصفحة
1.3	استنتاجات البحث	**26**
2.3	توصيات البحث	**26**

جـدول الصور		
رقم الصورة	عنوان الصورة	رقم الصفحة
١	محطة تشيرنوبل المحظورة	**6**
2	مستعمرة من الفطريات السوداء على جدران تشيرنوبيل	**8**
3	تجربة نمو الفطر على محطة فضاء دوليه	**10**
4	التركيب الجزيئي للميلانين	**15**
5	نمو فطر Cladosporium sphaerospermum	**21**
6	فطر Cryptococcus neoformans	**22**
7	فطر Wangiella dermatitidis	**23**
8	فطر Aureobasidium pullulans	**24**

الجداول		
رقم الجدول	العنوان	رقم الصفحة
1	يوضح المقارنة بين العمليتين التخليق الاشعاعي والتمثيل الضوئي	**17**

جدول المختصرات	
المختصر	**المعنى**
ROS	Reactive oxygen species
ISS	International Space Station
NMR	Nuclear magnetic resonance
FTIR	Fourier Transform Infrared
SOD	superoxide dismutase

الخلاصة

يتناول هذا البحث ظاهرة فريدة في علم الأحياء المجهري تتمثل في قدرة بعض أنواع الفطريات، وخصوصًا الفطريات السوداء المحتوية على صبغة الميلانين، على امتصاص الإشعاع المؤين الضار وتحويله إلى طاقة حيوية تدعم نموها ونشاطها الأيضي وقد لوحظت هذه الظاهرة لأول مرة في المناطق المحيطة بمفاعل تشيرنوبيل النووي بعد كارثة ١٩٨٦ حيث نمت هذه الفطريات بشكل موجه نحو مصادر الإشعاع، في سلوك غير معتاد يُشبه التوجه الضوئي في النباتات.

ركز البحث على دراسة الآليات الحيوية والكيميائية التي تمكن هذه الفطريات من امتصاص الإشعاع مثل التعديلات الخلوية، والأنزيمات المضادة للأكسدة والدور المركزي لصبغة الميلانين التي لا تكتفي بامتصاص الإشعاع بل تعمل على تحويله إلى طاقة كيميائية قابلة للاستخدام. كما استعرضت الدراسة إمكانيات توظيف هذه الفطريات في تطبيقات علمية مهمة، منها: **الحماية من الإشعاع في الفضاء، والمعالجة الحيوية للمناطق الملوثة إشعاعيًا، وصناعة المواد العازلة.**

تُعد هذه الفطريات نموذجًا حيًا مذهلًا على قدرة الكائنات الدقيقة على التكيف مع البيئات المتطرفة وتفتح آفاقًا واعدة في مجالات الأحياء الإشعاعية والتكنولوجيا الحيوية وعلوم الفضاء ما يجعل دراستها ذات أهمية استراتيجية علمية وتطبيقية على حد سواء.

منهجية البـحث وعينة الدراسة:

اعتمد هذا البحث على المنهج الوصفي التحليلي، وذلك من خلال مراجعة وتحليل الأدبيات والدراسات العلمية الحديثة التي تناولت الفطريات القادرة على امتصاص الإشعاع المؤين، مع التركيز على الجوانب البيوكيميائية والوراثية والبيئية المرتبطة بآليات امتصاص الإشعاع وتحويله إلى طاقة. تم جمع المعلومات من أبحاث منشورة في مجلات علمية محكمة وأُدرجت الدراسات الأكثر صلة بموضوع الفطريات المشعة، وخصوصًا تلك التي أُجريت في بيئات عالية الإشعاع مثل مفاعل تشيرنوبيل النووي ومحطة الفضاء الدولية.

أما **عينة البحث**، فقد تمثلت في مجموعة من الأنواع الفطرية التي تم دراستها من قبل باحثين متخصصين، وأبرزها:

- ***Cladosporium sphaerospermum***
- ***Wangiella dermatitidis***
- ***Cryptococcus neoformans***

وقد تم تحليل الخصائص الفيزيولوجية والكيميائية لهذه الأنواع من خلال البيانات والتجارب المنشورة مما أتاح للباحث استخلاص نتائج علمية دقيقة تدعم فرضيات البحث وتفتح آفاقًا لتطبيقات مستقبلية.

اهــداف الــدراسة (Aims of study):

يهــدف البحــث الى مــعرفـة ما يلي :

١) **دراسة قدرة بعض أنواع الفطريات على امتصاص الإشعاع المؤين وتحويله إلى طاقة حيوية.**
–لفهم الآليات الحيوية والكيميائية التي تمكن هذه الفطريات من مقاومة الإشعاع واستغلاله لصالحها.

٢) **تحديد الأنواع الفطرية القادرة على البقاء والنمو في البيئات المشعة.**
–مع التركيز على البيئات المتطرفة مثل مفاعل تشيرنوبل ومحطات الطاقة النووية.

٣) **استكشاف إمكانية استخدام هذه الفطريات في التطبيقات البيئية (البيوريميديييشن).**
–لاستخدامها في تنظيف المواقع الملوثة إشعاعيًا أو تقليل التأثير البيئي للنفايات المشعة.

٤) **تقييم التأثيرات البيولوجية للإشعاع على التركيب الخلوي والوراثي لهذه الفطريات.**
–لفهم كيفية تطورها وبقائها في ظروف الإشعاع المرتفع.

٥) **فتح آفاق جديدة في علم الأحياء الفضائية والتقنيات الحيوية.**
–بدراسة إمكانية استخدام هذه الفطريات في الحماية من الإشعاع في الفضاء أو في المستعمرات البشرية المستقبلية على الكواكب الأخرى.

المبحث الاول

المقدمة

الـمقدمة:

الإشـــعاع المؤين (Ionizing Radiation):

الإشعاع المؤين هو نوع من الإشعاع يمتلك طاقة كافية لإزالة إلكترونات من الذرات أو الجزيئات عند تفاعله معها مما يؤدي إلى تأيينها يشمل هذا النوع من الإشعاع كلًا من الأشعة السينية (X-rays) وأشعة غاما (γ-rays) وجسيمات ألفا وبيتا والنيوترونات يمكن أن يتسبب الإشعاع المؤين في تلف مباشر للحمض النووي والبروتينات أو بشكل غير مباشر عبر إنتاج أنواع الأوكسجين التفاعلي (ROS) ويمكن تعريف انواع الاوكسجين التفاعلي بانها ذرات او جزيئات تحتوي على اوكسجين تتميز بكونها شديدة التفاعل بسبب احتوائها علئ الكترونات غير مزدوجة مما يؤدي إلى الإجهاد التأكسدي والضرر الخلوي [Hall & Giaccia, 2012].

تنتج ROS بشكل طبيعي في الخلايا خلال عمليات الأيض لكن زيادتها بشكل غير طبيعي –كما يحدث بعد التعرض للإشعاع المؤين – قد يؤدي إلى ضرر خلوي كبير خصوصًا على البروتينات، الليبيدات والحمض النووي [Valko et al., 2007].

ومع ذلك فقد كشفت الدراسات الحديثة عن وجود كائنات حية دقيقة قادرة على **النمو والتكاثر في بيئات مشعة للغاية** من بين هذه الكائنات برزت مجموعة من الفطريات السوداء والتي تُعرف علميًا باسم **الفطريات الملونة بالميلانين(Melanize Fungi)** وتحديدًا النوع الذي يُظهر نمطًا فريدًا في توجيه نموه نحو مصادر الإشعاع. هذا التوجه لا يعكس مجرد مقاومة للإشعاع بل يُشير إلى **قدرة تكيفية نشطة** لاستغلال الطاقة الإشعاعية بطريقة مشابهة لما تقوم به النباتات مع الضوء عبر البناء الضوئي[[Zhdanova et al., 2000]] .

تُعد الفطريات من الكائنات الحية الدقيقة الأكثر قدرة على التكيف مع البيئات القاسية وقد شكلت محور اهتمام علمي متزايد في العقود الأخيرة في السنوات الأخيرة ازداد الاهتمام العلمي بالكائنات الحية القادرة على البقاء في البيئات القاسية وقد أثارت **الفطريات الشعاعية** أو ما يُعرف بـ **"Radiotrophic fungi"** اهتمامًا خاصًا نظرًا لقدرتها الفريدة على **النمو في بيئات مشعة عالية الطاقة** بل وامتصاص الإشعاع الضار وتحويله إلى طاقة تُستخدم في دعم أنشطتها الحيوية[[Dadachova et al., 2007]] .

تُعد هذه الفطريات مثالًا على **القدرة التطورية الفائقة للكائنات الدقيقة** في التكيف مع أقسى الظروف حيث تم العثور عليها في مواقع مثل مفاعل تشيرنوبيل النووي وبعض المحطات الفضائية بل وأُقترح استخدامها مستقبلًا لحماية رواد الفضاء من الإشعاع الكوني [[Zhdanova et al., 2000]].

تم التعرف على هذه الظاهرة لأول مرة بشكل موثق بعد كارثة تشيرنوبيل النووية عام ١٩٨٦، حين لاحظ العلماء ظهور طبقة سوداء على جدران مفاعل تشيرنوبيل المدمر وهي منطقة يُفترض أن تكون غير مأهولة بأي كائن حي نظرًا للجرعات المرتفعة جدًا من الإشعاع. التحاليل

البيولوجية أظهرت أن هذه الطبقة كانت عبارة عن فطريات سوداء تنمو وتتكاثر في بيئة يُعتقد بأنها غير صالحة للحياة. لم تكن هذه الكائنات تقاوم الإشعاع فحسب بل بدا أنها تنمو باتجاه مصادره مما يشير إلى وجود آلية حيوية توجه حركتها باتجاه الإشعاع وهي سلوكيات لم تكن معروفة سابقًا لدى الفطريات أو أي كائنات غير ضوئية أخرى[[Zhdanova et al., 2000]] .

تتميز هذه الفطريات بوجود مركب **الميلانين** بكميات كبيرة في جدرانها الخلوية أحد أهم المكونات التي ربطها الباحثون بهذه الظاهرة هو الميلانين وهو صبغة معروفة بوجودها في العديد من الكائنات من ضمنها الإنسان وهو ما يُعتقد أنه يلعب دورًا محوريًا في قدرتها على امتصاص الإشعاع. غير أن دور الميلانين في هذه الفطريات يبدو أكثر تعقيدًا وفاعلية تختلف وظيفة الميلانين في هذه الفطريات عن دوره في الكائنات الأخرى حيث يبدو أنه لا يقتصر على الحماية من الأشعة فوق البنفسجية أو الأشعة المؤينة بل يُعتقد أنه يساهم في **عملية تحويل الطاقة الإشعاعية إلى طاقة كيميائية** [Cordero & Casadevall, 2017].

و هوه يُساهم في امتصاص الإشعاع المؤين من نوع أشعة غاما وحتى الأشعة السينية ويُحدث تغييرات في البنية الإلكترونية للميلانين تجعل منه وسيطًا نشطًا لنقل الإلكترونات وتوليد الطاقة وتشير بعض التجارب إلى أن النمو الأحيائي للفطر يزداد بشكل ملحوظ عند تعريضه للإشعاع مقارنة بنموه في الظلام ما يُعزز فرضية أن الميلانين لا يؤدي وظيفة دفاعية فقط بل ربما يلعب دورًا مشابهًا للكلوروفيل في النباتات ولكن باستخدام طيف إشعاعي مختلف[[[Dadachova et al.,2007].

وإلى جانب الميلانين تشير نتائج بعض الدراسات إلى احتمال وجود آليات أخرى تُمكن هذه الفطريات من التعامل مع الإشعاع. إذ تم رصد زيادة في نشاط إنزيمات مضادة للأكسدة وظهور تعديلات في تركيب الأغشية الخلوية وهي تعديلات قد تساهم في زيادة القدرة على تحمل التأين الإشعاعي وتقليل الأثر التدميري للأوكسجين التفاعلي الناتج عن التعرض للأشعة [[Blachowicz et al., 2020]].

تمتلك الفطريات المشعة خصائص مميزة تجعلها نموذجًا فريدًا في علم الأحياء الإشعاعي. فهي غالبًا ما تنتمي إلى الرتب **(Chaetothyriales**و **Capnodiales)** وتُظهر تكيفات خلوية وبنيوية متقدمة تشمل:

- تراكيز عالية من **الميلانين** في جدرانها الخلوية.
- قدرات إصلاح DNA محسنة.
- آليات مضادة للأكسدة فاعلة.
- مرونة في الأغشية تُمكّنها من امتصاص الإشعاع وتعديل مساره [[Gorbushina 2007]].

الميزة الأبرز هي دور الميلانين الذي لا يقتصر على دوره التقليدي كمادة واقية بل يُعتقد أنه يؤدي دورًا **شبيهًا بمستقبلات الطاقة الشمسية** حيث يمتص الإشعاع المؤين ويحوّله إلى طاقة حيوية تُستخدم في تحفيز العمليات الحيوية داخل الفطر [[Cordero & Casadevall 2017]].

الميلانين وهو بوليمر معقّد موجود في العديد من الكائنات يُعد في الفطريات المشعة أكثر من مجرد صبغة فقد أظهرت تجارب طيف الامتصاص أنه قادر على امتصاص الإشعاع عبر مدى واسع من الطيف الكهرومغناطيسي، بما في ذلك الأشعة السينية وأشعة غاما [Dadachova et al., 2007].

كما تبين أن **الخصائص الإلكترونية للميلانين تتغير عند تعرضه للإشعاع** مما يسمح بنقل الإلكترونات بطريقة تُشابه الفوتوسنتيز في النباتات لكن باستخدام طاقة إشعاعية بدلاً من الضوء المرئي [[Turick et al., 2011]] .

هذا التكيف الفسيولوجي يُشير إلى أن هذه الفطريات لا تستفيد فقط من الإشعاع بل قامت بتطوير آليات بيوكيميائية تجعلها أكثر كفاءة في البقاء والنمو في بيئات لا يمكن لغيرها من الكائنات تحملها.

ولعل الأكثر إثارة للاهتمام هو ما كشفته الدراسات حول إمكانية استغلال هذه الكائنات في تطبيقات علمية مستقبلية. فقد اقترح بعض الباحثين إمكانية استخدام الفطريات السوداء كمادة حيوية للحماية من الإشعاع في الفضاء الخارجي خصوصًا في ضوء زيادة الاهتمام ببرامج استكشاف الفضاء الطويلة الأمد. كما يُمكن توظيف هذه الفطريات في المعالجة الحيوية للمناطق الملوثة إشعاعيًا وذلك لقدرتها على امتصاص الإشعاع وربما تفكيك بعض المركبات المشعة مما يُقلل من خطورتها على البيئة والإنسان[[Tesei et al., 2022]] .

في ضوء كل هذه المعطيات يُعد البحث في الفطريات التي تمتص الإشعاع الضار من المجالات الواعدة علميًا وتطبيقيًا لما تحمله من إمكانيات هائلة في فهم حدود الحياة وتطوير تقنيات جديدة لمقاومة الإشعاع. وسيُعنى هذا البحث بتتبع تاريخ اكتشاف هذه الفطريات وتوثيق الظروف التي ظهرت فيها وتحليل خصائصها البيولوجية والفيزيولوجية الفريدة إضافة إلى دراسة التخليق الحيوي لمركب الميلانين وآلية عمله في امتصاص الإشعاع إلى جانب رصد آليات أخرى قد تلعب دورًا في هذا التفاعل الفريد بين الكائن الحي والطاقة الإشعاعية.

المبحث الثاني

الخلفية النظرية

١,٢. الأكتشاف الأولي لهذه الفطريات :

كان اكتشاف الفطريات القادرة على امتصاص الإشعاع المؤين بمثابة لحظة فارقة في تاريخ العلوم البيولوجية لأنها شكّلت تحديًا للمفاهيم السائدة حول حدود الحياة واستجابتها للظروف البيئية القاسية لقد ارتبط هذا الاكتشاف بسياق تاريخي مأساوي تمثل في **انفجار مفاعل تشيرنوبيل النووي** الذي اعتُبر آنذاك أحد أكبر الكوارث النووية التي عرفها العالم فقد أدى هذا الانفجار إلى تسرب كميات هائلة من المواد المشعة مثل السيزيوم-١٣٧ والسترونتيوم-٩٠ والبلوتونيوم-٢٣٩ إلى البيئة مشكّلة منطقة حظر إشعاعي واسعة النطاق عُرفت باسم "المنطقة المحرّمة."

صورة (١) محطة تشيرنوبل المحظورة

كان يُعتقد أن هذه المنطقة التي تعرضت لجرعات إشعاعية قاتلة غير صالحة إطلاقًا لأي شكل من أشكال الحياة المعقدة أو الدقيقة. لكن وبعد سنوات من المراقبة والدراسات البيئية بدأ الباحثون يلاحظون سلوكيات غير متوقعة في بعض الكائنات الدقيقة وخاصة على جدران المفاعل نفسه حيث تم توثيق نمو فطريات سوداء اللون ليس فقط على الأسطح الخاملة بل في مناطق غنية بالنشاط الإشعاعي وهي ملاحظة خالفت جميع التوقعات الأولية[[Zhdanova et al, 2000]] .

كانت البداية الحقيقية للاهتمام العلمي حين قام فريق بقيادة العالمة الأوكرانية (**ناتاليا زداناتوفا**) بعزل هذه الفطريات وتحليلها وتم التعرف على أنواع متعددة من هذه الكائنات أبرزها (***Cladosporium sphaerospermum***) وهي فطريات داكنة تحتوي على نسبة عالية من الميلانين في جدرانها الخلوية المفاجأة كانت أن هذه الفطريات لا تتحمل الإشعاع فحسب بل تنمو بشكلٍ أفضل عند تعرضها له ما دفع العلماء إلى طرح سؤالٍ مفصلي: هل يمكن أن يكون الإشعاع مصدرًا للطاقة لهذه الكائنات؟[[Zhdanova et al., 2000]] .

لتفسير هذه الظاهرة بدأت فرق بحثية من عدة دول أبرزها الولايات المتحدة وروسيا وأوكرانيا، بإجراء تجارب معملية لفهم العلاقة بين الإشعاع ونمو الفطريات. وكانت من بين الدراسات المحورية تلك التي نشرتها العالمة **إيليزابيث داداتشوفا** وفريقها عام ٢٠٠٧ والتي أظهرت أن الميلانين الموجود في هذه الفطريات يُغيّر من حالته التأكسدية عند تعرضه للإشعاع ما يسمح بامتصاص طيف واسع من الطاقة الإشعاعية وتحويلها إلى طاقة كيميائية قابلة للاستخدام داخل الخلية[[Dadachova et al., 2007]] .

وقد استخدم الباحثون في تلك الدراسات طيف أشعة غاما لفحص تأثير الإشعاع على النمو الميكروبي ولاحظوا أن الفطريات الغنية بالميلانين نمت بمعدل أعلى بنسبة ٢٠٪ إلى ٣٠٪ مقارنة بالفطريات العادية غير المحتوية على الميلانين ما شكّل أول دليل تجريبي قوي على أن الميلانين ليس مجرد واقٍ ضوئي أو عامل حماية بل قد يكون وسيلة لتحويل الإشعاع إلى طاقة أيضية [[Dadachova et al., 2007]] .

هذه النتائج غيرت الطريقة التي ننظر بها إلى الكائنات الحية وعلاقتها بالطاقة. فبينما تعتمد النباتات على الضوء المرئي في عملية البناء الضوئي عبر الكلوروفيل تبدو هذه الفطريات وكأنها طوّرت نموذجًا موازيًا يعتمد على الإشعاع المؤين والميلانين. لقد بدأ العلماء في استخدام مصطلحات جديدة مثل (**الاستفادة الحيوية من الإشعاع** radiotropism) و(التمثيل الإشعاعي *radiosynthesis*) لوصف هذه الظاهرة البيولوجية النادرة [Cordero Casadevall 2017].

وقد وُسع البحث في السنوات اللاحقة ليشمل مناطق أخرى ذات نشاط إشعاعي طبيعي أو ناتج عن الإنسان مثل مناجم اليورانيوم المهجورة والمواقع العسكرية القديمة. وتم العثور في هذه الأماكن على أنواع فطرية مماثلة من أجناس مثل *Cryptococcus* و *Exophiala* و *Wangiella* تتمتع جميعها بخصائص مشتركة أهمها اللون الداكن نتيجة احتوائها على كميات عالية من الميلانين[[Blachowicz et al., 2020]] .

وقد ازدادت أهمية هذه الفطريات في سياق **استكشاف الفضاء** حين تم اقتراح استخدامها كدرع بيولوجي ضد الإشعاع الفضائي ففي عام ٢٠٢٠ نُقلت عينات من *Cladosporium sphaerospermum* إلى محطة الفضاء الدولية(ISS) وتمت مراقبة نموها في بيئة الفضاء،حيث أظهرت قدرة على **امتصاص جزء من الإشعاع الكوني** ما زاد من الآمال بإمكانية استخدامها في حماية رواد الفضاء في المهام الطويلة، مثل الرحلات إلى المريخ [[Blachowicz et al., 2020]].

إن قصة اكتشاف هذه الفطريات تمثل منعطفًا علميًا هامًا لأنها تُعيد تعريف ما يُمكن أن نعتبره "قابلًا للحياة" وتفتح المجال لفهم جديد حول **تكيف الكائنات الحية مع مصادر طاقة غير تقليدية** .كما تُظهر قدرة الكائنات المجهرية على **تطوير آليات حيوية معقدة** للبقاء في ظروف قد تبدو قاتلة من وجهة نظر الإنسان وتُمهد الطريق لتطبيقات مستقبلية في مجالات:

(الطب، والبيئة، والتقنية الحيوية) وحتى علوم الفضاء.

صورة (٢) مستعمرة من الفطريات السوداء على جدران تشيرنوبيل

٢,٢.التـجارب العلمية التي أجـراها العلماء على هذه الفطريات:

منذ اللحظة الأولى لاكتشاف الفطريات السوداء التي تنمو في المناطق المشعة بدأت الأسئلة تتوالى حول طبيعة هذه الكائنات الدقيقة وكيفية قدرتها على العيش – بل والازدهار – في بيئة تُعتبر قاتلة لغالبية أشكال الحياة المعروفة. وقد فتح هذا الاكتشاف الباب أمام موجة من التجارب العلمية التي هدفت إلى التحقق من **قدرة هذه الفطريات على امتصاص الإشعاع وآلية ذلك وإمكانية تسخيرها لتطبيقات مستقبلية**.

أولى التجارب الممنهجة بدأت في تسعينيات القرن العشرين عندما قام فريق بقيادة **زداناتوفا وزملائها** بعزل أنواع مختلفة من الفطريات من داخل وخارج المفاعل النووي في تشيرنوبيل ولاحظوا أن الأنواع المحتوية على صبغة الميلانين كانت أكثر وفرة في المناطق المشعة مقارنة بالمناطق الأقل إشعاعًا. وتم تأكيد هذا الانطباع مخبريًا عبر **زراعة الفطريات في بيئات مشعة وغير مشعة** ومراقبة معدل النمو فيها. وأظهرت النتائج أن هذه الفطريات نمت بنسبة أعلى بشكل ملحوظ في البيئات المشعة، ما يشير إلى وجود علاقة طردية بين الإشعاع ومعدل النمو [[Zhdanova et al., 2000]].

لاحقًا تطورت هذه التجارب لتُصبح أكثر تعقيدًا حيث قام الباحثون بتعريض عينات من الفطريات لصور مختلفة من الإشعاع المؤين ك(أشعة غاما وأشعةX) مع مراقبة التغيرات في البنية الخلوية والمركبات البيوكيميائية. وكان من أهم الاكتشافات أن الميلانين الموجود في هذه الفطريات لا يظل خاملاً بل يدخل في تفاعلات فيزيائية عند تعرضه للإشعاع مما يؤدي إلى **تغيرات في الترتيب الإلكتروني داخل الجزيء تسمح بامتصاص الطاقة وتحويلها لطاقة كيميائية** تُستخدم في عمليات الأيض [[Dadachova et al., 2007]] .

في واحدة من أشهر التجارب قام فريق **إيليزابيث داداتشوفا** في كلية ألبرت أينشتاين الطبية في نيويورك باستخدام **فطر(*Cladosporium sphaerospermu*)** وعرضه لإشعاع غاما بجرعات مختلفة. لاحظ الفريق أن معدل النمو كان أعلى بنسبة ٣٠٪ عند تعريض الفطريات للإشعاع مقارنة بالفطريات التي لم تتعرض له. كما أظهرت التحاليل الطيفية أن الميلانين أصبح أكثر "نشاطًا" في امتصاص الطاقة بعد التعرض للإشعاع ما يُشير إلى **آلية مشابهة للتمثيل الضوئي، ولكن باستخدام الإشعاع بدلًا من الضوء** أي نوع من "التمثيل الإشعاعي " [[Dadachova et al., 2007]].

ولم تقتصر التجارب على المختبرات الأرضية بل امتدت إلى الفضاء الخارجي. ففي عام ٢٠١٩ أجرى فريق من الباحثين من معهد (Frontier Development La*b*) بالتعاون مع وكالة ناسا تجربة على متن محطة الفضاء الدولية (ISS) حيث زرعوا فطر *Cladosporium sphaerospermum* داخل وحدة تحكم مصممة لقياس الإشعاع. وخلال فترة التجربة التي استمرت ٣٠ يومًا لاحظ العلماء أن طبقة رقيقة من الفطر استطاعت **تقليل نسبة الإشعاع**

الكوني بمقدار ٢٪ تقريبًا وهي نتيجة مذهلة بالنظر إلى أن السماكة لم تتجاوز الميليمتر الواحد [[Blachowicz et al., 2020]].

وفي هذه التجربة الفضائية تم توثيق قدرة هذه الفطريات ليس فقط على النجاة من الإشعاع الكوني بل على **النمو بشكل أكثر فاعلية مقارنة بالبيئة الأرضية المقارنة** وكان لذلك آثار كبيرة على مجال دراسة المواد الحيوية القابلة للاستخدام كـ"درع حي" ضد الإشعاع في الفضاء لا سيما في سياق استكشاف المريخ أو القمر [[Blachowicz et al., 2020]].

ولم تتوقف التجارب عند قياس النمو فحسب بل سعى العلماء أيضًا إلى فهم الآليات الجزيئية والفسيولوجية الكامنة خلف هذه الظاهرة. فاستخدموا تقنيات مثل **التحليل الطيفي بالرنين المغناطيسي النووي (NMR)** و**التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)** لتحليل تركيب الميلانين وتغيراته كما استخدموا المجاهر الإلكترونية لدراسة البنية الفطرية تحت تأثير الإشعاع. وأكدت هذه التحاليل أن الميلانين يعمل كـ"نظام ناقل للطاقة" حيث يمتص الجسيمات المشحونة من الإشعاع ثم يُعيد توزيعها في شكل طاقة كيميائية داخلية يمكن استخدامها من قبل الخلية[[Cordero & Casadevall, 2017]] .

وفي محاولة لتحديد حدود هذه القدرة قام باحثون بعزل الميلانين من الفطر ثم اختباره بشكل منفصل دون وجود الخلية الفطرية فوجدوا أن الميلانين وحده يمكنه امتصاص الإشعاع وتحويله لكنه يصبح أكثر فاعلية ضمن السياق الخلوي ما يشير إلى وجود **تكامل بين المركب الصبغي والأنظمة البيولوجية في الخلية**.وقد أسفرت هذه التجارب عن فهم أوسع لما يمكن أن تُنجزه الكائنات الحية الدقيقة في البيئات المتطرفة كما فتحت المجال لأبحاث جديدة في مجالات **الحماية الإشعاعية البيولوجية والتكنولوجيا الحيوية والهندسة الوراثية** حيث يسعى العلماء حاليًا إلى **دمج الجينات المسؤولة عن إنتاج الميلانين في كائنات أخرى أو صناعتها بطرق صناعية** لاستخدامها في تطبيقات مستقبلية متعددة.

صورة (٣) تجربة نمو الفطر على محطة فضاء دوليه

٢,٣.خـصائص هـذه الفطريات:

تميز الفطريات القادرة على امتصاص الإشعاع المؤين بمجموعة فريدة من الخصائص البيولوجية والفيزيولوجية التي تجعلها متميزة عن بقية الكائنات الحية الدقيقة هذه الخصائص ليست فقط نتيجة التكيف مع البيئات القاسية بل تعكس أيضًا قدرة الكائن الحي على استغلال مصادر طاقة غير تقليدية مثل الإشعاع في عملياته الحيوية من أبرز هذه الفطريات التي دُرست علميًا Cryptococcus neoformans ، Cladosporium sphaerospermum، Wangiella dermatitidis وهي جميعًا تشترك في بعض السمات الجوهرية التي تجعلها مرشحة ممتازة للدراسات البيولوجية المستقبلية[[Dadachova et al., 2007]] .

مميزات هذه الفطريات :

١. تتميز هذه الفطريات هي **قدرتها العالية على إنتاج الميلانين** وهي صبغة داكنة تتواجد بكثافة في جدرانها الخلوية وتؤدي دورًا محوريًا في امتصاص الإشعاع وتحويله إلى طاقة كيميائية. هذا الميلانين لا يُفرَز بشكل سطحي فقط بل يُدمج داخل طبقات الجدار الخلوي الفطري ليعمل كدرع بيولوجي واقٍ ومُحول طاقة في آنٍ واحد. والأكثر إثارة أن بعض الأنواع تُعدّل من كمية الميلانين التي تُنتجها بناءً على شدة الإشعاع المحيط بها في عملية تُشبه ما يُعرف بالتنظيم الجيني التكيفي[[Cordero & Casadevall, 2017]] .

٢. وتتميّز هذه الفطريات أيضًا بقدرتها على **تحمل جرعات عالية من الإشعاع المؤين** تصل أحيانًا إلى عدة آلاف من الراد (rad) وهي جرعات قاتلة بالنسبة لمعظم الكائنات الحية بما في ذلك البشر. فبينما تموت الخلايا البشرية بجرعة تتراوح بين **(٤٠٠-٦٠٠)** راد يمكن لبعض هذه الفطريات أن تبقى حية في جرعات تزيد عن (٥,٠٠٠ **راد)** بل وتنمو في ظل هذه الظروف[[Zhdanova et al., 2000]].

٣. من الخصائص الفريدة الأخرى أنها تُظهر **سلوكًا موجّهًا نحو الإشعاع** يُعرف علميًا باسم *radiotropism* أي أنها لا تكتفي بتحمل الإشعاع بل تنمو باتجاهه كما لو أنها "تبحث" عنه كمصدر للطاقة وقد تم توثيق هذا السلوك لأول مرة في فطر ***Cladosporium sphaerospermum*** المزروع في بيئة تحتوي على مصادر إشعاعية غير متجانسة حيث لاحظ الباحثون أن النمو الفطري كان موجّهًا بوضوح نحو الجانب الأعلى إشعاعًا [[Dadachova et al., 2007]].

٤. على مستوى البنية الخلوية تُظهر هذه الفطريات **جدرانًا خلوية أكثر سمكًا من المعتاد** وغنية بمركبات الميلانين والبولي سكاريدات المعقدة التي تساعدها على مقاومة الإجهاد البيئي. كما أنها تحتوي على **أنظمة إصلاح DNA فعالة للغاية** ويمكن تعريف انظمة اصلاح الـ DNA على انها اليات خلويه متخصصه تعمل على كشف وتصحيح الاضرار التي تصيب المادة الوراثية (DNA) بسبب عوامل داخليه مثل الأخطاء في تضاعف الDNA أو تراكم الجذور الحرة الناتجة عن عمليات الأيض او خارجية مثل الاشعة فوق البنفسجية والاشعاع وهذه الانظمة تحافظ على استقرار الجينوم مما يسمح لها بالتعامل

مع التلف الجيني الناتج عن الإشعاع وهو ما يُفسر بقاءها وتكاثرها في بيئات تحتوي على مستويات عالية من الضرر الإشعاعي[[Cordero & Casadevall, 2017]].

٥. تُظهر هذه الفطريات أيضًا قدرة على **النمو في ظروف غذائية محدودة للغاية** بل ويمكنها استخدام مصادر كربون غير تقليدية مثل المواد الهيدروكربونية أو بعض المعادن القليلة الذوبان. وقد فُسّر هذا التكيف بأنه ناتج عن ضغط بيئي طويل الأمد أجبر هذه الأنواع على تطوير استراتيجيات بقاء عالية الكفاءة [Blachowicz et al., 2020].

٦. أظهرت الدراسات أن هذه الفطريات تمتلك **قدرات أكسدة قوية** ناتجة عن نشاط إنزيمات مثل **الكاتالاز** و**السوبرأوكسيد ديسموتاز** والتي تحميها من التأثيرات الضارة للجذور الحرة الناتجة عن الإشعاع مما يمنحها حماية إضافية ضد الإجهاد التأكسدي [[Blachowicz et al., 2020]].

٧. تمتاز هذه الفطريات بقدرتها على العيش في نطاق واسع من درجات الحرارة حيث أظهرت بعض الأنواع قابلية للنمو في درجات حرارة منخفضة تصل إلى ٤ درجات مئوية ومرتفعة تتجاوز ٤٠ درجة مئوية ما يجعلها فطريات "متعددة البيئات" أو *polyextremophiles*. هذا التكيّف يجعلها مرشحة مثالية للاستخدام في بيئات فضائية أو مواقع صناعية تحتوي على إشعاع عالي [[Blachowicz et al 2020]].

كل هذه الخصائص تجعل من الفطريات المشعة كائنات استثنائية ليس فقط من حيث القدرة على البقاء بل من حيث إمكانية **تطبيقها في مجالات متعددة مثل الحماية الإشعاعية والتحفيز الحيوي البيئي وعلوم الفضاء**. وقد بدأ العلماء فعلًا في التفكير بإدخال هذه الكائنات في **تقنيات الطلاءات الواقية وتصميم المواد الذكية، وحتى المعالجات الطبية المبتكرة** التي تستفيد من قدرة الميلانين على امتصاص الإشعاع وحماية الخلايا الحية.

٤,٢.الاماكن التي توجد فيها هذه الفطريات:

الفطريات القادرة على امتصاص الإشعاع والتي تُعرف علميًا أحيانًا بـ "الفطريات المشعة" أو ***radiotrophic fungi*** ليست كائنات نادرة كما كان يُعتقد سابقًا. فبعد اكتشافها الأولي في مفاعل تشيرنوبيل عام ١٩٩١ بدأ العلماء في تتبع وجودها في بيئات متنوعة حول العالم خصوصًا تلك التي تتميز بمستويات عالية من الإشعاع أو الظروف البيئية القاسية. وقد أظهرت النتائج أن هذه الفطريات لا تقتصر على مكان معين بل تتوزع في **البيئات النووية، والفضائية، والصناعية، وأحيانًا البيئات الطبيعية** التي تحتوي على إشعاع طبيعي مرتفع أو معادن ثقيلة [[Zhdanova et al., 2000]].

١. محطة تشيرنوبيل النووية – أوكرانيا

تُعد محطة تشيرنوبيل المكان الأول والأشهر الذي اُكتشفت فيه هذه الفطريات وذلك بعد كارثة ١٩٨٦ التي أطلقت كميات ضخمة من الإشعاع في البيئة. وداخل المفاعل المتفجر

ووسط الحطام المشع، لاحظ العلماء وجود طبقات سوداء تنمو على الأسطح المعدنية وجدران المفاعل بعد تحليل هذه الطبقات، تبين أنها مكوّنة من أنواع متعددة من الفطريات السوداء المحتوية على الميلانين مثل *Cladosporium cladosporioides*_ و *Wangiella dermatitidis* [[Dadachova et al., 2007]].

هذه الفطريات لم تكتفِ بالبقاء بل أظهرت قدرة على التكاثر والنمو النشط في قلب المنطقة "المحرّمة" حيث يصل الإشعاع إلى آلاف الراد. وتم لاحقًا عزل أكثر من ٣٥ نوعًا من الفطريات من المنطقة المحيطة بتشيرنوبيل معظمها أظهرت خصائص امتصاص إشعاعي واضحة [[Zhdanova et al., 2000]].

٢. محطات الطاقة النووية الأخرى ومختبرات الأبحاث

تم اكتشاف هذه الفطريات لاحقًا في مواقع أخرى عالية الإشعاع حول العالم منها مختبرات الأبحاث النووية في روسيا والولايات المتحدة حيث نمت على جدران غرف تخزين المواد المشعة، وفي محيط مفاعلات نووية عاملة مثل مفاعل (Hanford) في ولاية واشنطن الأمريكية.[[Cordero & Casadevall, 2017]] .

٣. المناجم والمناطق الجيولوجية الغنية باليورانيوم والمعادن الثقيلة

كشفت دراسات لاحقة عن وجود أنواع مشابهة من الفطريات السوداء في مناجم اليورانيوم حيث تزداد معدلات الإشعاع الطبيعي. ومن المثير للاهتمام أن هذه الفطريات لا تعتمد فقط على الإشعاع المؤين بل أظهرت أيضًا قدرة على النمو في بيئات غنية بالمعادن الثقيلة والظروف الحمضية ما يدل على تعدد أشكال تكيفها البيئي[[Gadd, 2007]] .

٤. المركبات الفضائية ومحطة الفضاء الدولية (ISS)

أظهرت الدراسات الحديثة وجود الفطريات المشعة لا سيما النوع ***Cladosporium sphaerospermum*** في عدة أماكن داخل المركبات الفضائية ومحطة الفضاء الدولية (**ISS**) حيث تم رصدها في مناطق يصعب الوصول إليها أو تلك التي تتسم بظروف دقيقة تسمح للفطريات بالنمو رغم بيئة الفضاء القاسية من أبرز هذه الأماكن: **الزوايا الداخلية للمقصورات، الفجوات بين الألواح والجدران، الإطارات المحيطة بالنوافذ، والأسطح البلاستيكية والمعدنية التي لا يتم تنظيفها بشكل متكرر. كما وُجدت على الأسطح الداخلية للمعدات العلمية، وحول أنظمة التهوية** حيث تتوفر الرطوبة والدفء بنسب بسيطة تسمح بتكاثرها وُفضّل هذه الفطريات المواقع التي توفر درجات حرارة مستقرة نسبيًا ومستويات محدودة من الرطوبة وظلالًا تحجب الضوء المباشر مما يعكس قدرتها العالية على التكيف مع التغيرات البيئية الدقيقة داخل المركبة. ووجودها في هذه المناطق لا يُعد مجرد مصادفة بل يُشير إلى أن لديها آليات بقاء فعالة تمكّنها من الاستقرار في بيئة تنعدم فيها الجاذبية، وتُسجَّل فيها مستويات مرتفعة من الإشعاع الكوني. وقد أشار العلماء إلى أن الميلانين الموجود في

جدران خلايا هذه الفطريات يلعب دورًا رئيسيًا في حمايتها من هذا الإشعاع، مما يمنحها ميزة تنافسية عالية داخل البيئة الفضائية.

إن وجود الفطريات المشعة في هذه المواضع داخل محطة الفضاء لا يثير فقط الفضول العلمي حول قدرتها على البقاء، بل يفتح المجال أيضًا أمام استخدامها مستقبلًا كعناصر فعالة في تكوين دروع بيولوجية أو نظم ذاتية الإصلاح لحماية البشر والمعدات في رحلات الفضاء طويلة الأمد [[Blachowicz et al., 2020]].

٥. البيئات الحضرية الملوثة

تم أيضًا العثور على هذه الفطريات في بعض البيئات الحضرية التي تحتوي على مستويات عالية من التلوث الصناعي مثل المناطق المجاورة لمصانع إنتاج الأسمدة الكيماوية أو مواقع التخلص من النفايات النووية. ويميل هذا النوع من الفطريات إلى النمو على الأسطح الخرسانية والمعدنية مستفيدًا من الميلانين لحمايته من العوامل الكيميائية والمشعة [[Dadachova et al., 2007]].

٦. الأماكن الطبيعية ذات الإشعاع الأرضي المرتفع

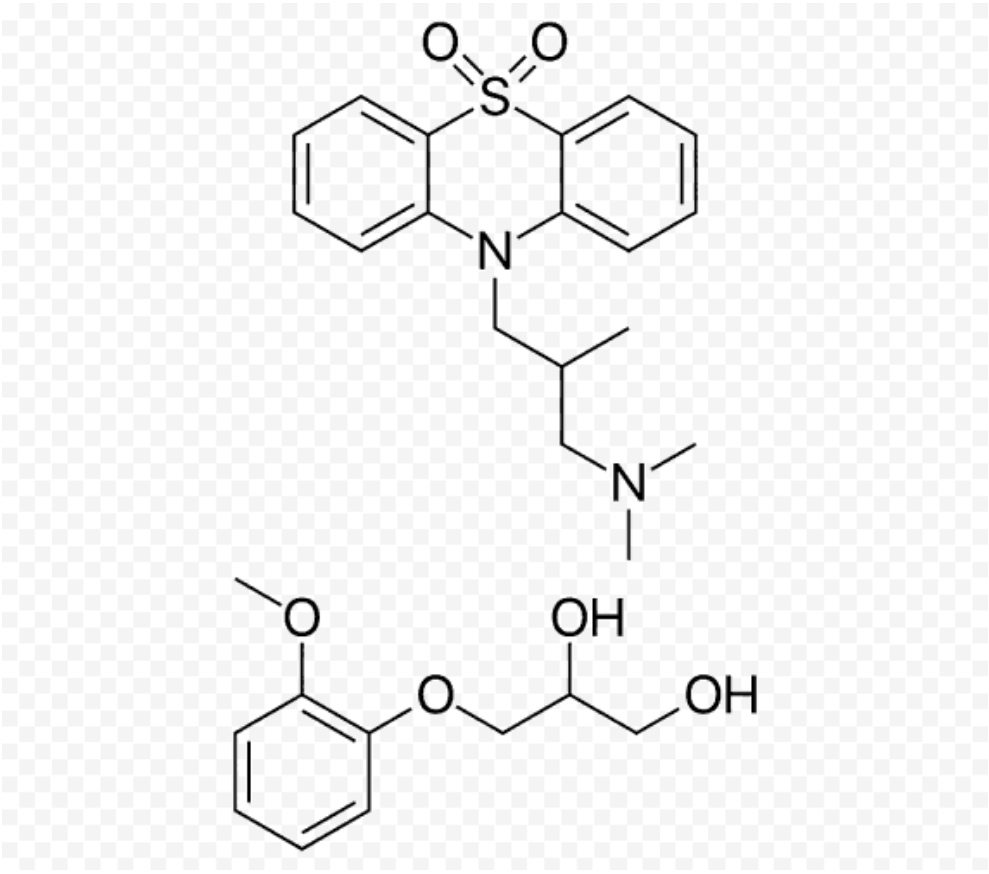
بعض الدراسات الحديثة وجدت أن فطريات مماثلة تنمو في مناطق طبيعية تحتوي على **إشعاع أرضي مرتفع** ناتج عن تكوينات جيولوجية معينة مثل صخور الغرانيت أو رواسب الراديوم واليورانيوم الطبيعية وتُعد مناطق في إيران والبرازيل والهند من بين المواقع التي تم فيها رصد مثل هذه الفطريات وإن كانت بدرجات أقل تركيزًا من المناطق الصناعية [[Gadd, 2007]] .

٥,٢. التخليق الحيوي للميلانين :

الميلانين هو صبغة عضوية معقدة تُعد من أكثر الجزيئات تنوعًا ووظائف في الطبيعة ويوجد في مختلف الكائنات الحية من الإنسان إلى الفطريات إلا أن دوره في الفطريات المشعة يتجاوز حدود الحماية الضوئية أو الدور الجمالي ليصل إلى مستويات عميقة من **التفاعل مع الطاقة الإشعاعية** وتحويلها إلى طاقة كيميائية قابلة للاستخدام الخلوي في عملية تُعرف باسم **التخليق الإشعاعي Radiotrophy**

ويمكن معرفة كيف يتكوّن الميلانين في الفطريات يتكوّن الميلانين في الفطريات من خلال مسارات بيوكيميائية تبدأ غالبًا من الحمض الأميني **التيروسين** أو من مركب **L-DOPA** حيث تقوم إنزيمات معينة مثل **التيروزيناز (Tyrosinase)** أو **اللاكاز (Laccase)** بأكسدة هذه المركبات وتحويلها إلى مركبات وسيطة هذه المركبات تتكاثف لاحقًا في تفاعلات غير إنزيمية لتكوين بوليمرات الميلانين وهي جزيئات داكنة معقدة التركيب بعد التخليق يُدمج الميلانين في الجدار الخلوي للفطر أو يُخزَّن في حويصلات خلوية خاصة تُعرف باسم *melanosomes* تختلف تفاصيل هذا المسار حسب نوع الفطر لكن النتيجة النهائية واحدة: إنتاج صبغة

الميلانين التي تُعتبر أحد أبرز مكونات الفطريات المشعة [[Cordero & Casadevall, 2017]].



صورة (٤) التركيب الجزيئي للميلانين

١,٥,٢. التوزيع الإستراتيجي للصبغة:

يتواجد الميلانين في الفطريات المشعة بشكل خاص داخل **الجدار الخلوي** ويتوزع ضمن طبقات متعددة تحيط بالهيكل الخلوي للفطر. ويتراكم الميلانين في قنوات صغيرة ومصفوفات متفرعة مما يجعله يشكل شبكة ثلاثية الأبعاد قادرة على اعتراض الإشعاع الداخل وتحويله. ومن اللافت للنظر أن هذه الفطريات قد تزيد من إنتاج الميلانين استجابةً لمستويات الإشعاع العالية مما يشير إلى آلية استشعار دقيقة للإشعاع وتنظيم ديناميكي للإنتاج [[Cordero & Casadevall 2017]]

وقد أظهرت صور المجهر الإلكتروني لفطر ***Cryptococcus neoformans*** و ***Cladosporium sphaerospermum*** أن طبقات الميلانين تُحيط بجدار الخلية بسمك يصل إلى عدة ميكرونات ما يعزز من فعاليته كمادة مانعة للإشعاع وقادرة على امتصاصه [[Blachowicz et al., 2020]]

٢,٥,٢.آلية عمل الميلانين في امتصاص وتحويل الإشعاع:

الميزة الفريدة لصبغة الميلانين تكمن في **تركيبها الجزيئي متعدد الحلقات** الذي يحتوي على روابط غير مشبعة ومجموعات كيميائية نشطة ما يمنحها قدرة على امتصاص طيف واسع من الأشعة الكهرومغناطيسية بما في ذلك **الإشعاع المؤين مثل أشعة غاما وبيتا** وبعد امتصاص الإشعاع يخضع الميلانين لتغيرات في شحناته الإلكترونية تسمح له بتحفيز تفاعلات كيميائية داخل الخلية تُنتج عنها طاقة قابلة للاستخدام مثل ATP عبر نقل الإلكترونات [[Dadachova et al., 2007]].

وقد بيّنت الدراسات أن الميلانين المُعرّض للإشعاع يزداد نشاطه الأيضي بنسبة تصل إلى ٤ أضعاف مقارنة بالميلانين غير المعرض كما أن الخلايا الفطرية التي تحتوي عليه تُظهر معدلات نمو أعلى بكثير في البيئات المشعة، ما يؤكد الدور الحيوي للصيغة الكيميائية للميلانين في التفاعل مع الإشعاع[[Cordero & Casadevall, 2017]] .

٣,٥,٢. عملية التخليق الإشـعاعي(Radiosynthesis):

التخليق الإشعاعي هو عملية حيوية نادرة تقوم بها بعض الكائنات الدقيقة مثل الفطريات المشعة حيث تستفيد من الإشعاع المؤين كمصدر للطاقة في هذه الظاهرة، تقوم صبغة الميلانين الموجودة في جدران خلايا الفطر بامتصاص الأشعة المؤينة مثل أشعة غاما، وتحويل طاقتها إلى طاقة كيميائية تُستخدم في دعم العمليات الحيوية داخل الخلية، كالنمو، والانقسام، وإصلاح الحمض النووي تُعد هذه الآلية فريدة من نوعها، إذ تختلف عن معظم طرق الحصول على الطاقة المعروفة في الكائنات الحية وتُظهر قدرة بيولوجية متقدمة على استغلال مصادر طاقة غير تقليدية. رغم اختلاف المصدر يمكن تشبيه عملية التخليق الإشعاعي بعملية التمثيل الضوئي في النباتات من حيث المبدأ فكلاهما يعتمد على صبغة تمتص نوعًا من الطاقة وتحولها إلى طاقة كيميائية لكن الفارق الجوهري يكمن في نوع الطاقة والوسيط المستخدم

عملية التخليق الأشعاعي مقارنة بعملية التمثيل الضوئي:

يمكن تشبيه عملية التخليق الإشعاعي (Radiotrophic metabolism) بعملية التمثيل الضوئي(Photosynthesis) لكن مع فرق جوهري في نوع الطاقة المستخدمة وآليات التحويل. ففي التمثيل الضوئي تستخدم النباتات الطاقة الضوئية من الشمس لتحفيز تفاعلات تحويل ثاني أكسيد الكربون والماء إلى جلوكوز بوجود صبغة الكلوروفيل كوسيط.

أما في التخليق الإشعاعي فإن الميلانين يحل محل الكلوروفيل كجزيء وسيط ويستخدم الإشعاع المؤين بدلًا من الضوء المرئي كمصدر للطاقة. وبدلًا من إنتاج جلوكوز يُعتقد أن الطاقة الناتجة تُستخدم مباشرة في تحفيز عمليات حيوية مثل إصلاح الـ DNA ونقل الإلكترونات وزيادة كفاءة دورة الطاقة ATP في الخلية الفطرية.

جدول (١) يوضح المقارنة بين العمليتين

التخليق الإشعاعي (RADIOSYNTHSIS)	التمثيل الضوئي (PHOTOSYNTHESIS)
تعتمد على الإشعاع المؤين (مثل أشعة غاما) كمصدر للطاقة.	**تعتمد على ضوء الشمس كمصدر للطاقة.**
تقوم به بعض الفطريات المشعة مثل Cladosporium sphaerospermum.	**تقوم به النباتات، الطحالب، وبعض أنواع البكتيريا.**
يستخدم الميلانين الموجود في جدران الخلية لامتصاص وتحويل الإشعاع.	**يستخدم الكلوروفيل الموجود في البلاستيدات الخضراء لامتصاص الضوء.**
تحدث في البيئات عالية الإشعاع مثل مفاعل تشيرنوبل أو محطة الفضاء الدولية.	**تحدث في البيئات التي تحتوي على ضوء وماء وثاني أكسيد الكربون.**
تؤدي إلى تحويل الطاقة الإشعاعية إلى طاقة كيميائية تستخدمها الخلية للبقاء والنمو.	**تؤدي إلى إنتاج الجلوكوز والأكسجين، وهما مهمان للكائنات الأخرى.**
لا تنتج غذاء واضح مثل السكريات، بل تستخدم الطاقة مباشرة في التفاعلات الخلوية.	**تُستخدم السكريات الناتجة كمصدر طاقة وتخزين غذائي طويل الأمد.**

٦,٢. آليـة تـحويل الإشــعاع إلى طاقة مفيدة:

لم يقتصر الاكتشاف الثوري للفطريات القادرة على امتصاص الإشعاع على مجرد ملاحظة قدرتها على البقاء في بيئات مشعة بل فتح المجال لتساؤل علمي جوهري :**كيف تقوم هذه الكائنات بتحويل الإشعاع إلى طاقة مفيدة بيولوجيًا؟** وما هي الآليات الأخرى إلى جانب الميلانين، التي تساهم في هذا التفاعل المعقد؟ ثم ما الذي يعنيه هذا الاكتشاف للإنسان وللمجالات التقنية والعلمية المتعددة؟

١,٦,٢.آليـة تحويل الإشـعاع إلى طاقة مفيدة داخــل الخلية الفطرية:

تشير الأدلة التجريبية إلى أن الميلانين يلعب الدور المحوري في امتصاص الإشعاع المؤين إلا أن تحويل هذه الطاقة إلى **طاقة كيميائية قابلة للاستخدام** يتطلب تفاعلات خلوية متسلسلة تشمل مكونات أخرى. عند امتصاص الإشعاع يُعتقد أن الميلانين يدخل في حالة "تنشيط إلكتروني" حيث ينتقل إلى حالة مؤكسدة مؤقتة تُطلِق فيها الإلكترونات الحرة ضمن نظام الجدار الخلوي.

هذه الإلكترونات لا تتوقف هناك بل تُمرر إلى سلاسل نقل إلكتروني شبيهة بتلك الموجودة في الميتوكوندريا حيث تُحفز إنتاج الطاقة على هيئة ATP مما يُغذي العمليات الحيوية للفطر ويعزز من قدرته على النمو والانقسام[[Dadachova et al., 2007]] .

وقد أظهرت التجارب أن مستويات الإنزيمات المرتبطة بتفاعلات الأكسدة-الاختزال تزداد بشكل واضح في الفطريات المشعة عند التعرض للإشعاع مما يدل على وجود **دورة داخلية للطاقة مستمدة من الأشعة المؤينة** [[Cordero & Casadevall, 2017]].

٢,٦,٢.آليات أخـرى غير الميـلانين تسـاعد على امـتصاص وتحويل الإشعاع:

وعلى الرغم من أهمية الميلانين إلا أن الدراسات الحديثة بدأت تكشف عن عناصر إضافية تساهم في هذا النوع من التمثيل الطاقي من بينها:

١. **البروتينات المرتبطة بالإجهاد التأكسدي** : هي مجموعة من البروتينات التي تُنتجها الخلايا استجابةً لحالة الإجهاد التأكسدي وهي حالة تنجم عن تراكم الجذور الحرة (Reactive Oxygen Species)التي تُسبب تلفًا في مكونات الخلية مثل الحمض النووي والبروتينات والدهون تشمل هذه البروتينات الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل **Superoxide Dismutase (SOD)** و **Catalase** و **Glutathione Peroxidase** والتي تعمل على معادلة الجذور الحرة وحماية الخلايا من الضرر مثل *superoxide dismutase* و*glutathione peroxidase* والتي تلعب دورًا في تخفيف الأثر الضار للإشعاع وفي نقل الإلكترونات.

٢. **الجزيئات المساعدة** : **Co-factors** كالنحاس والمنغنيز والزنك التي تُوجد بتركيزات عالية نسبيًا في بعض الفطريات المشعة وتساعد في عمليات نقل الشحنات والتحفيز الإنزيمي.

٣. **مركبات الفينول والبوليفينول** :التي تعزز من القدرة على امتصاص الإشعاع وتعمل كوسيطات في تفاعلات تحويل الطاقة[[Gadd, 2007]] .

٤. **التحور في الجينات المنظمة لعملية الاستقلاب** :أظهرت التحاليل الوراثية أن بعض هذه الفطريات تحتوي على جينات معدلة تُنشط فقط في ظروف الإشعاع مما يتيح للفطر التكيف الأيضي السريع [[Blachowicz et al., 2020]] .

٣,٦,٢.التطبيقات المستقبلية لهذه الفطريات:

القدرة غير المسبوقة للفطريات المشعة على امتصاص الإشعاع وتحويله إلى طاقة فتحت أبوابًا واسعة في عدة مجالات علمية وتطبيقية:

١. الحـماية من الإشـعاع في الفضاء

اقترح العلماء استخدام نوع معين من الفطريات المشعة مثل ***Cladosporium sphaerospermum*** كوسيلة بيولوجية مبتكرة للحماية من الإشعاع الكوني الذي يُعد من أخطر التحديات التي تواجه رواد الفضاء والمعدات خلال السفر إلى الفضاء إذ يتعرض الرواد لمستويات عالية جدًا من الإشعاع المؤين مثل أشعة غاما وهو ما يمكن أن يسبب تلفًا مباشرًا في الخلايا والأنسجة بالإضافة إلى تأثيره السلبي على الأنظمة الإلكترونية الحساسة وجاء اقتراح العلماء اعتمادًا على خصائص فريدة تمتلكها هذه الفطريات إذ تحتوي جدران خلاياها على كميات مرتفعة من الميلانين وهو مركب حيوي يتمتع بقدرة كبيرة على امتصاص الإشعاع المؤين وبناءً على هذه الخاصية اقترح العلماء استخدام هذه الفطريات من خلال تغطية الجدران الداخلية للمحطات الفضائية بطبقات من الفطر لتعمل كدرع بيولوجي حي يمتص الإشعاع قبل أن يصل إلى الإنسان أو الأجهزة وقد تم اختبار هذه الفكرة فعليًا في تجربة على متن محطة الفضاء الدولية (ISS) حيث غُطي جزء من نوافذ وحدة مختبرية بطبقة رقيقة جدًا من الفطر بسماكة ١,٧ ملم وكانت النتيجة انخفاضًا في مستوى الإشعاع بنسبة وصلت إلى ٢٪، وهو رقم مهم جدًا بالنظر إلى سماكة الطبقة الصغيرة [[Blachowicz et al., 2020]]. وعند تعرض هذه الفطريات للإشعاع يعمل الميلانين على امتصاص جزء كبير من طاقته وتحويله إلى طاقة كيميائية مما يقلل من كمية الإشعاع النافذ ويُخفف من تأثيره وقد تم بالفعل اختبار هذه الفكرة عمليًا على متن محطة الفضاء الدولية (ISS) حيث قام العلماء بتغطية جزء من نوافذ وحدة مختبرية بطبقة رقيقة جدًا من الفطر بسماكة لا تتجاوز ١,٧ ملم وأظهرت النتائج انخفاضًا ملحوظًا في مستوى الإشعاع بنسبة تصل إلى ٢٪، وهو إنجاز مهم بالنظر إلى بساطة الغطاء وسمكه الصغير [[Blachowicz et al., 2020]].

الاقتراح لا يقتصر فقط على استخدام هذه الفطريات كطبقة واقية بل يتعدى ذلك إلى الاستفادة من قدرتها على التجدد الذاتي إذ يمكن للفطر النمو تلقائيًا في بيئة الفضاء مما يجعله خيارًا مستدامًا وفعّالًا من حيث التكلفة مقارنة بالدروع الصناعية الثقيلة والمكلفة ونتيجة للنجاح الذي حققته تجربة ***Cladosporium sphaerospermum*** أصبح العلماء يدرسون الآن إدخال هذه الفطريات في تركيب مواد بناء بيولوجية يمكن استخدامها مستقبلاً في إنشاء

مستعمرات بشرية على سطح القمر أو المريخ لتشكّل طبقة حيوية واقية من الإشعاع الكوني القاسي [[Blachowicz et al., 2020]].

٢. معالجة النفايات النووية

يمكن استخدام هذه الفطريات في **التنظيف البيولوجي للمناطق الملوثة إشعاعيًا** أو كعوامل استقرار في أماكن تخزين المواد النووية حيث تنمو في البيئات ذات الإشعاع العالي وتُخفف من تأثيراته تدريجيًا[[Gadd, 2007]] .

تمثل النفايات النووية تحديًا بيئيًا وصحيًا كبيرًا بسبب طبيعتها المشعة وعمرها الطويل في البيئة مما يتطلب حلولًا فعّالة ومستدامة لإدارتها ومن بين التقنيات الحديثة التي تم اقتراحها في هذا المجال هو **استخدام الكائنات الحية الدقيقة مثل الفطريات المشعة** والتي أظهرت قدرة ملحوظة على البقاء والنمو في البيئات عالية الإشعاع.

تشير الدراسات إلى أن بعض أنواع الفطريات مثل ***Cladosporium sphaerospermum*** تمتلك آليات فريدة تساعدها على امتصاص الإشعاع وتحويله إلى طاقة من خلال عملية تُعرف بـ الميلانين راديوليسيس (melanin radiolysis) حيث تَستخدم الميلانين الموجود في جدران خلاياها لحماية نفسها من الإشعاع واستخدامه كمصدر طاقة[[Gadd, 2007]] .

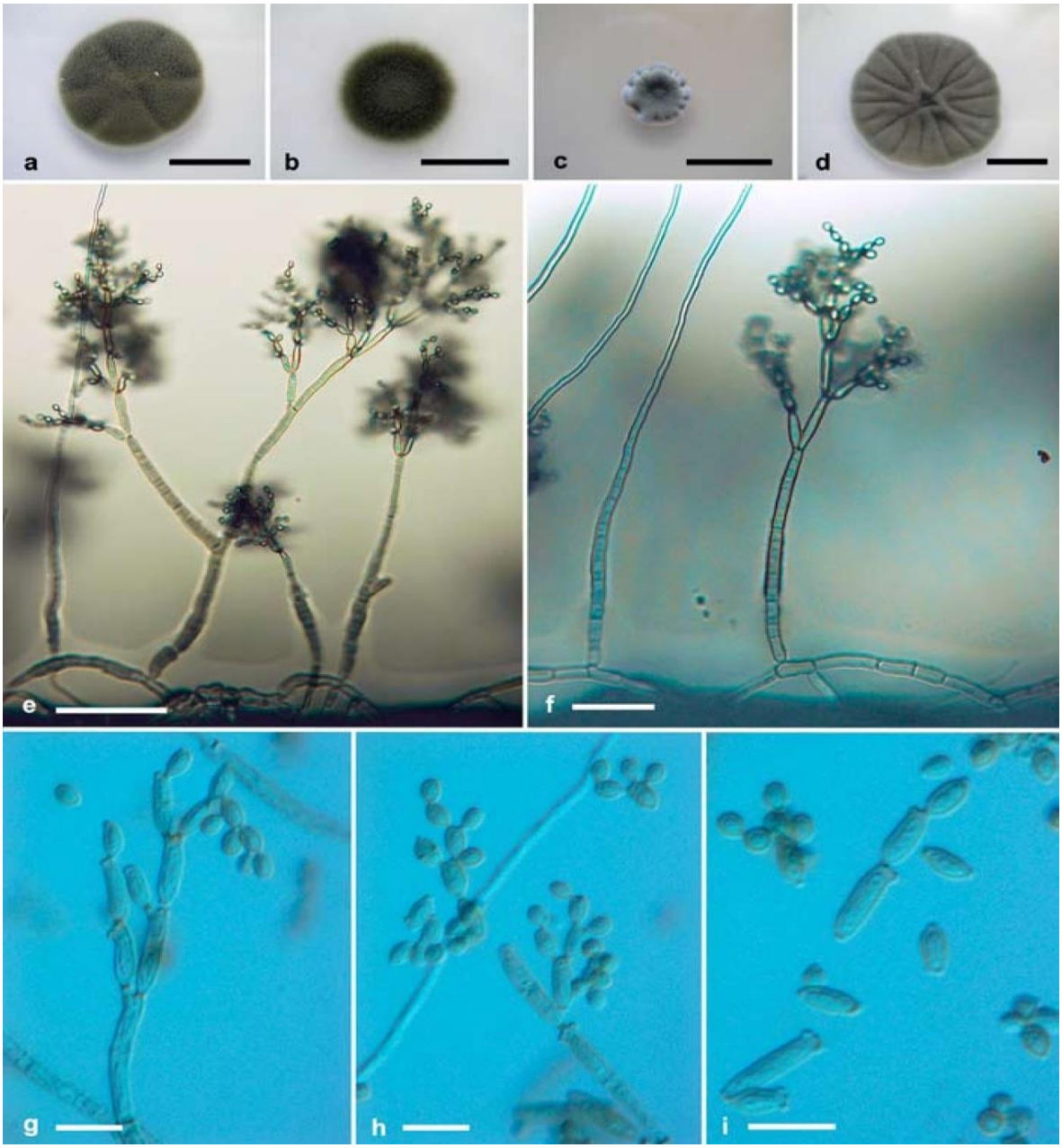
يمكن استخدام هذه الفطريات في **التنظيف البيولوجي (Bioremediation)** للمناطق الملوثة إشعاعيًا وذلك عن طريق زرعها في المواقع المصابة حيث تقوم بامتصاص أو تثبيت النظائر المشعة ضمن بنيتها الخلوية، مما يساهم في تقليل انتشار المواد المشعة. كما يُمكن أن تُستخدم كعوامل **استقرار حيوي** في مواقع تخزين النفايات النووية بحيث تخلق حاجزًا حيويًا يمنع تسرب الإشعاع إلى البيئة المحيطة.

٣. تصنيع مواد عازلة إشعاعيًا

يُدرس الميلانين المستخرج من هذه الفطريات حاليًا في صناعة **دهانات ومركبات بوليمرية** تُستخدم كطبقات عازلة في البدلات الفضائية وأنظمة حماية الطائرات بدون طيار العاملة في المناطق الملوثة.

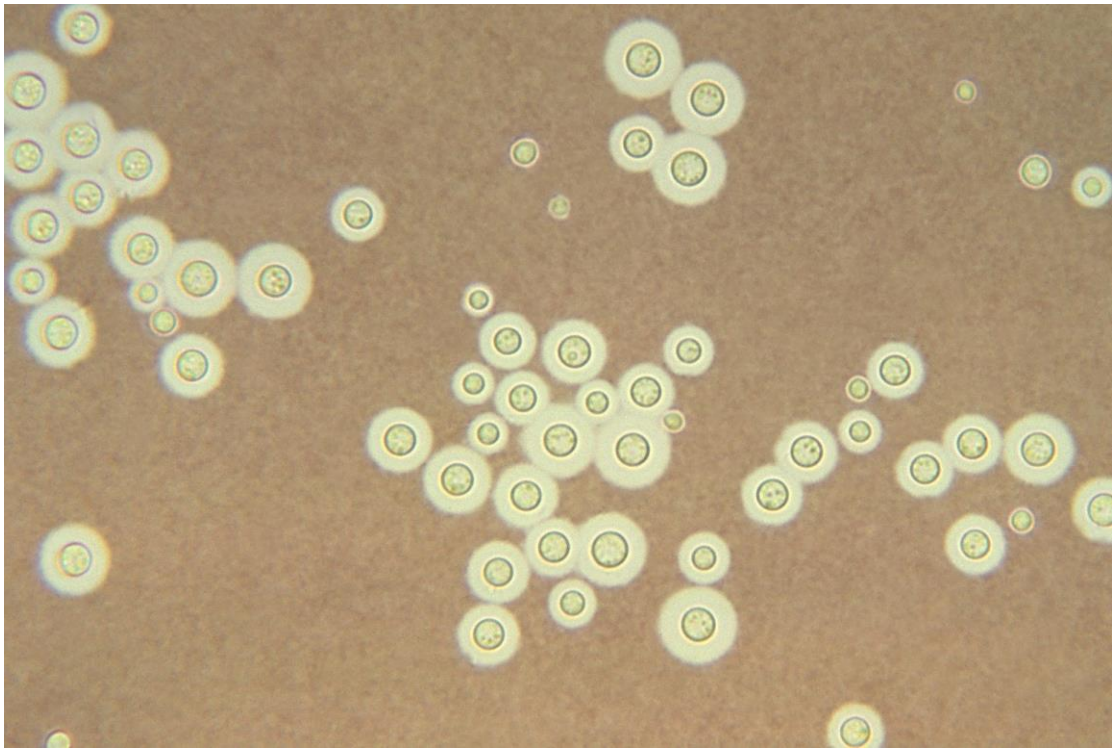
٤. الاستفادة في مجال الطاقة الحيوية

رغم أن التكنولوجيا لا تزال في بداياتها إلا أن بعض الباحثين يقترحون إمكانية استخدام هذه الفطريات ضمن **أنظمة إنتاج طاقة بيولوجية تعتمد على الإشعاع** في المستقبل على غرار الخلايا الشمسية الحيوية[[Cordero & Casadevall, 2017]] .



صورة (٥) نمو فطر ***Cladosporium sphaerospermum***

يُعد هذا الفطر من **أشهر الفطريات المشعة** وهو من الفطريات السوداء شائعة الانتشار لكنه أدهش العلماء عندما نُقل إلى محطة الفضاء الدولية عام ٢٠١٩ حيث أظهر **نموًا متسارعًا** بنسبة تفوق ٢٠٪ مقارنة ببيئات غير مشعة وأظهر **قدرة واضحة على امتصاص الأشعة الكونية** [[Blachowicz et al., 2020]].

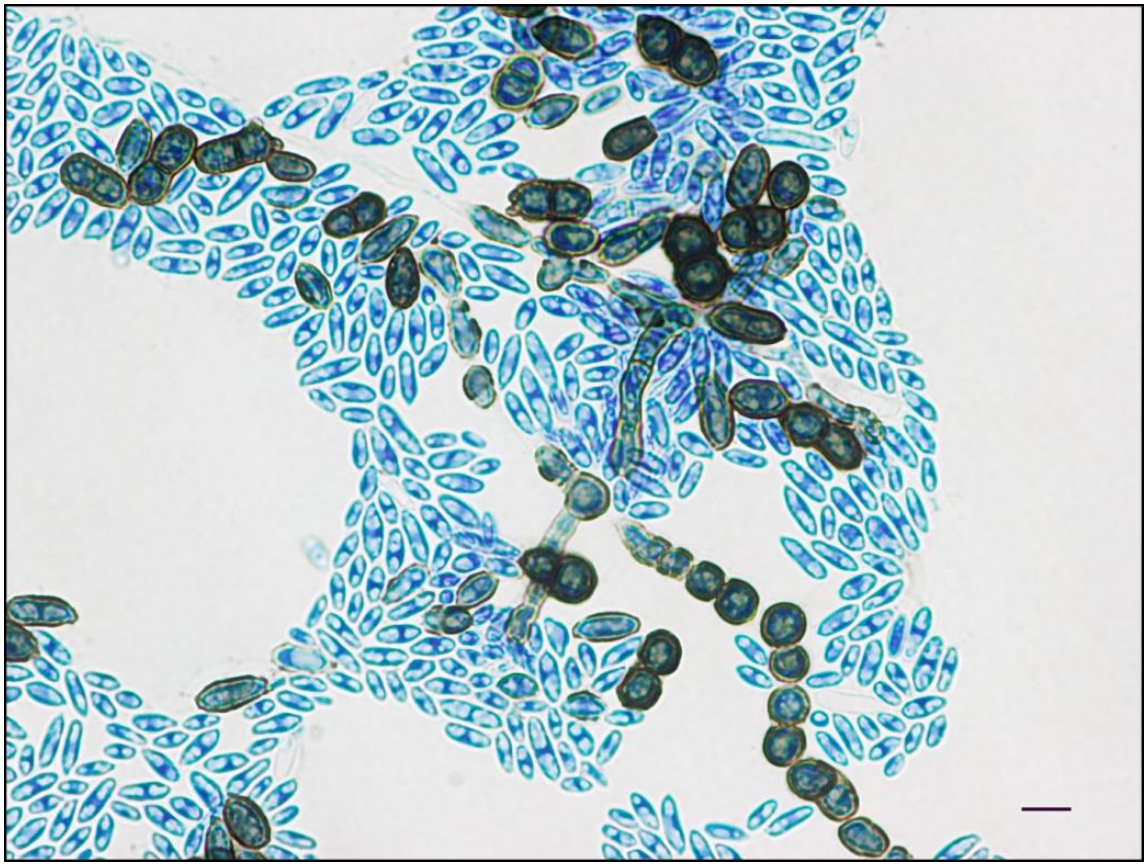


صورة (٦) فطر *Cryptococcus neoformans*

فطر خميري الشكل مغطى بطبقة سميكة من الميلانين ويُعد أحد أهم النماذج الفطرية المدروسة فيما يخص امتصاص الإشعاع. هذا الفطر ليس فقط مشعًا بل هو أيضًا ممرض للبشر حيث يمكن أن يسبب التهاب السحايا ولكن تكوينه الميلانيني يجعله مقاومًا بشدة للأشعة فوق البنفسجية والأشعة المؤينة [[Casadevall et al., 2000]] .

صورة (٧) فطر ***Wangiella dermatitidis***

نوع آخر من الفطريات السوداء يظهر سلوكًا مشابهًا لفطر ***Cryptococcus***من حيث التكوين الميلانين وقد أثبتت الدراسات أن لديه **نشاطًا فسيولوجيًا معززًا في بيئات إشعاعية** ينتمي هذا الفطر إلى مجموعة الفطريات السابروفيه التي تستطيع العيش على المواد العضوية المتحللة مما يجعله مرشحًا ممتازًا للتطبيقات البيئية.



صورة (٨) فطـــر *Aureobasidium pullulans*

يُعتبر ***Aureobasidium pullulans*** من الفطريات القادرة على التكيف مع البيئات القاسية ومنها البيئات المشعة يحتوي هذا الفطر على صبغة الميلانين وهي مادة تمنحه اللون الأسود أو البني وتُساعده في امتصاص الإشعاع المؤين والتقليل من تأثيره الضار وقد أظهرت الدراسات أن وجود الميلانين بكميات كبيرة في جدران خلايا هذا الفطر يُعزز من قدرته على تحمّل الإشعاع وتحويل جزء منه إلى طاقة يمكن أن يستفيد منها في عمليات النمو إضافة إلى ذلك يتمتع هذا الفطر بخصائص بيئية مميزة منها قدرته على امتصاص بعض الملوثات والمعادن الثقيلة من البيئة، بما في ذلك المناطق الملوثة إشعاعيًا مما يجعله مفيدًا في مجالات التنظيف البيئي ومعالجة النفايات المشعة.

المبحث الثالث

استنتاجات وتوصيات

١,٣.استنتاجات البحث:

١. الفطريات المشعة تمثل نموذجًا فريدًا للكائنات التي لا تتكيف فقط مع البيئات القاسية بل تستغلها لصالحها.

٢. الميلانين يُعد المحور الأساسي في امتصاص الإشعاع إلا أن العملية أكثر تعقيدًا وتشمل منظومة بيولوجية متكاملة.

٣. استخدام هذه الفطريات يمتد من الحماية البيولوجية إلى تطبيقات محتملة في الطاقة وعلوم الفضاء، والتقنية الحيوية.

٤. لا تزال هناك فجوات في فهم آلية "التخليق الإشعاعي" خصوصًا على المستوى الجزيئي مما يستدعي المزيد من البحث.

٢,٣.توصيات البحث:

١. **إجراء دراسات وراثية معمقة** لفهم الجينات المسؤولة عن النشاط الإشعاعي الحيوي في هذه الفطريات وربما نقلها إلى كائنات أخرى لتوسيع نطاق التطبيقات.

٢. **توسيع نطاق التجارب في الفضاء** ودراسة تأثير الإشعاع الكوني طويل الأمد على سلوك الفطريات المشعة في بيئات الجاذبية الصغرى.

٣. **تصميم مواد بناء بيولوجية هجينة** تعتمد على الفطريات المشعة لعزل الإشعاع في المنشآت النووية أو مستعمرات الفضاء.

٤. **تحفيز البحث في مجال الطاقة البيولوجية** باستخدام الفطريات، كمصدر محتمل لإنتاج طاقة صديقة للبيئة عبر الإشعاع خاصة في بيئات لا يصلها الضوء.

٥. **دراسة تأثير هذه الفطريات على الصحة العامة** عند استخدامها في بيئات مأهولة بالبشر لا سيما الأنواع الممرضة منها مثل (*Cryptococcus neoformans*)

٦. **تشجيع التعاون الدولي بين مراكز الأبحاث النووية والفضائية** لتوحيد الجهود في استثمار هذا الاكتشاف الفريد.

٧. مواجهة التحديات المستقبلية المرتبطة بتوظيف الفطريات المشعة في البيئات الصناعية والفضائية بما في ذلك صعوبة التحكم في نموها وإمكانية تحورها الوراثي غير المتوقع والتحديات التقنية في دمجها ضمن أنظمة البنية التحتية أو الأجهزة الحساسة.

المـــــــــصادر

1. Blachowicz, A., Romsdahl, J., Chiang, Y.-M., Elsaesser, A., Kalkum, M., & Venkateswaran, K. (2020). **Human presence impacts fungal diversity of inflated lunar/Mars analog habitat. Frontiers in Microbiology,11,567791. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.567791**
2. Casadevall, A., & Nosanchuk, J. D. (2000). **Melanin in fungal pathogens. Clinical Microbiology Reviews, 13(4), 687–694. https://doi.org/10.1128/CMR.13.4.687-694.2000**
3. Cordero, R. J. B., & Casadevall, A. (2017). **Functions of fungal melanin beyond virulence. Fungal Biology Reviews, 31(2), 99–112. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.12.003**
4. Dadachova, E., & Casadevall, A. (2007). **Ionizing radiation: How fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin. Environmental Microbiology, 9(5), 1348–1351. https: //doi.org / 10.1111/j.1462-2920.2007.01263.x**
5. Dadachova, E., Bryan, R. A., Huang, X., Moadel, T., Schweitzer, A. D., Aisen, P., Nosanchuk, J. D., & Casadevall, A. (2007). **Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi. PLOS ONE, 2(5), e457. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000457**
6. Dadachova, E., Bryan, R. A., Howell, R. C., Schweitzer, A. D., Aisen, P., Nosanchuk, J. D., & Casadevall, A. (2008). **Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi. PLOS ONE, 3(5), e4579. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004579**
7. Gadd, G. M. (2007). **Geomycology: Biogeochemical transformations of rocks,minerals,metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. Mycological Research, 111(1), 3–49. https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001**
8. Gorbushina, A. A. (2007). **Life on the rocks. Environmental Microbiology,9(7),1613–1631.https://doi.org/10.1111/j.1462 2920.2007.01301.x**
9. Mironenko, N. V., Alekhina, I. A., Zhdanova, N. N., & Bulat, S. A. (2000). **Intraspecific variation in resistance to ionizing radiation in fungi from Chernobyl. Mycologia, 92(6), 1091–1096. https:// doi.org/10.2307/3761675**

10. Tesei, D., Tafer, H., Poyntner, C., Pinar, G., Sterflinger, K., & Zakharova, K. (2022). **Black fungi: Beautiful and deadly inhabitants of extreme environments. Current Opinion in Microbiology, 67, 102138. https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102138**

11. Turick, C. E., Caccavo, F., Tisa, L. S., & Shade, A. (2011). **Electron transfer mechanisms in melanin pigments. Applied and Environmental Microbiology,77(16),5822–5830. https: // doi.org/10.1128/AEM.05371-11**

12. Zhdanova, N. N., Tugay, T., Dighton, J., Zheltonozhsky, V., & McDermott, P. (2004). **Fungi from Chernobyl: Mycobiota of the inner regions of the containment structures of the damaged nuclear reactor. Mycological Research, 108(9), 1089–1096. https://doi.org/10.1017/S0953756204000600**

13. Zhdanova, N. N., Zakharchenko, V. A., Vember, V. V., & Nakonechnaya, L. T. (2000). **Ionizing radiation attracts soil fungi. Mycological Research, 104(11), 1423–1429. https://doi.org/10.1017/S0953756200003118**