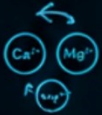


# آلية التبادل الأيوني في القضاء على البكتيريا وعلاقتها بأزمة مقاومة المضادات الحيوية



حماية ذكية  
ضد العدوى البكتيرية



تبادل أيوني نشط  
يسحب الكالسيوم والمغنيسيوم  
من الخلية البكتيرية



تخريب الغشاء الخلوي  
تمزق الغشاء وتسرب المحتويات  
الخلوية يؤدي إلى القضاء  
على البكتيريا



ضمادة ذكية  
لتسريع التئام الجروح  
والحماية المستدامة

تكنولوجيا  
متقدمة



## ملخص تنفيذي

تواجه البشرية تهديداً متصاعداً بسبب مقاومة البكتيريا للمضادات الحيوية، مما يجعل علاج الإصابات البسيطة أكثر تعقيداً. في هذا السياق، يقدم منتج "زيلو-اتش" نهجاً مختلفاً: بدلاً من مهاجمة البكتيريا كيميائياً، يستخدم آلية فيزيائية عبر التبادل الأيوني لتمزيق الغشاء البكتيري وتدمير الخلية. هذه الورقة تشرح هذه الآلية مبسطة، معززة بالأدلة العلمية، وتناقش كيف تساهم في تقليل احتمالية نشوء المقاومة الدوائية.

## ١. المقدمة: الخطر الصامت – مقاومة المضادات الحيوية

تُصنّف مقاومة مضادات الميكروبات (AMR) كأحد أكبر ١٠ تهديدات صحية عالمية تواجه البشرية في العصر الحديث. تشير التقديرات والتقارير الطبية إلى أن العدوى المقاومة للأدوية قد تتسبب في وفاة ١٠ ملايين شخص سنوياً بحلول عام ٢٠٥٠، وهو رقم مرعب يتجاوز حالات الوفاة السنوية الناتجة عن أمراض مزمنة وخطيرة مثل السرطان والسكري.

### كيف تنشأ المقاومة؟

عندما نستخدم مضاداً حيوياً تقليدياً، فإنه يستهدف مساراً استقلابياً معيناً في البكتيريا (مثل بناء الجدار الخلوي، تخليق البروتين، أو تضاعف الحمض النووي). بعض البكتيريا تمتلك طفرات جينية تمكّنها من:

- إنتاج إنزيمات تحطم المضاد الحيوي.
- تغيير شكل المستقبل المستهدف فلا يرتبط به الدواء.
- ضخ الدواء خارج الخلية بسرعة.

هذه البكتيريا المقاومة تبقى وتتكاثر، ناقلةً صفاتها المقاومة إلى أجيال جديدة وحتى إلى أنواع بكتيرية أخرى. بهذه الطريقة، يصبح المضاد الحيوي عديم الفائدة مع الوقت.

### المشكلة مع الجروح والحروق:

المريض المصاب بحرق أو جرح مزمن معرض بشكل كبير للإصابة بالعدوى البكتيرية. الاستخدام المتكرر للمضادات الحيوية الموضعية يزيد من احتمالية ظهور سلالات مقاومة على سطح الجرح نفسه، مما يعقّد العلاج.

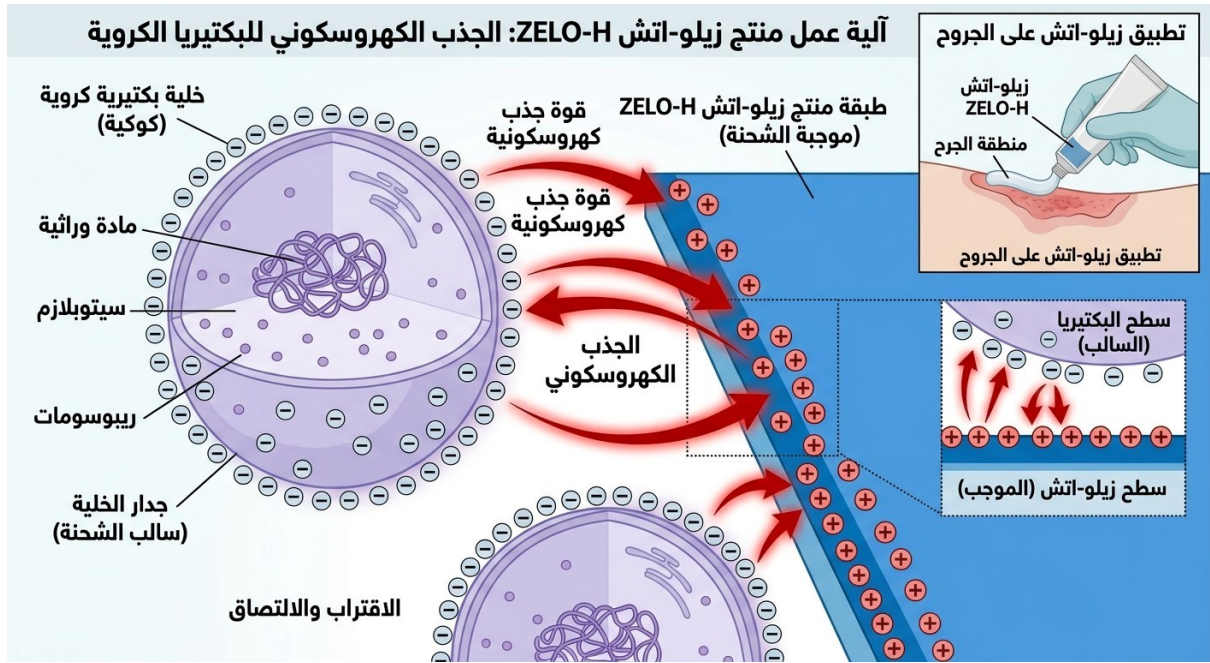
## ٢. آلية عمل زيلو-اتش: التبادل الأيوني القاتل

زيلو-اتش لا يستخدم مضادات حيوية كيميائية. بدلاً من ذلك، يعتمد على فيزياء الأسطح والتبادل الأيوني. يمكن تلخيص الآلية في ثلاث خطوات متسلسلة:

### الخطوة الأولى: الاجتذاب الأيوني (المصيدة الكهروسكونية)

يحمل الغشاء الخلوي للبكتيريا شحنة سالبة بطبيعته، بسبب وجود مجموعات الفوسفات والتيشويك أسيد. في المقابل، تم تصميم سطح زيلو-اتش ليكون غنياً بمجموعات أيونية موجبة الشحنة (كاتيونات نشطة).

عندما تلامس البكتيريا سطح المادة، يحدث تجاذب كهروسكوني قوي بين السطح الموجب والغشاء البكتيري السالب. البكتيريا تُحبس فوراً على السطح، مثلما تنجذب قطعة ورق صغيرة إلى بالون مشحون.



شكل ١: المصيدة الكهروسكونية.

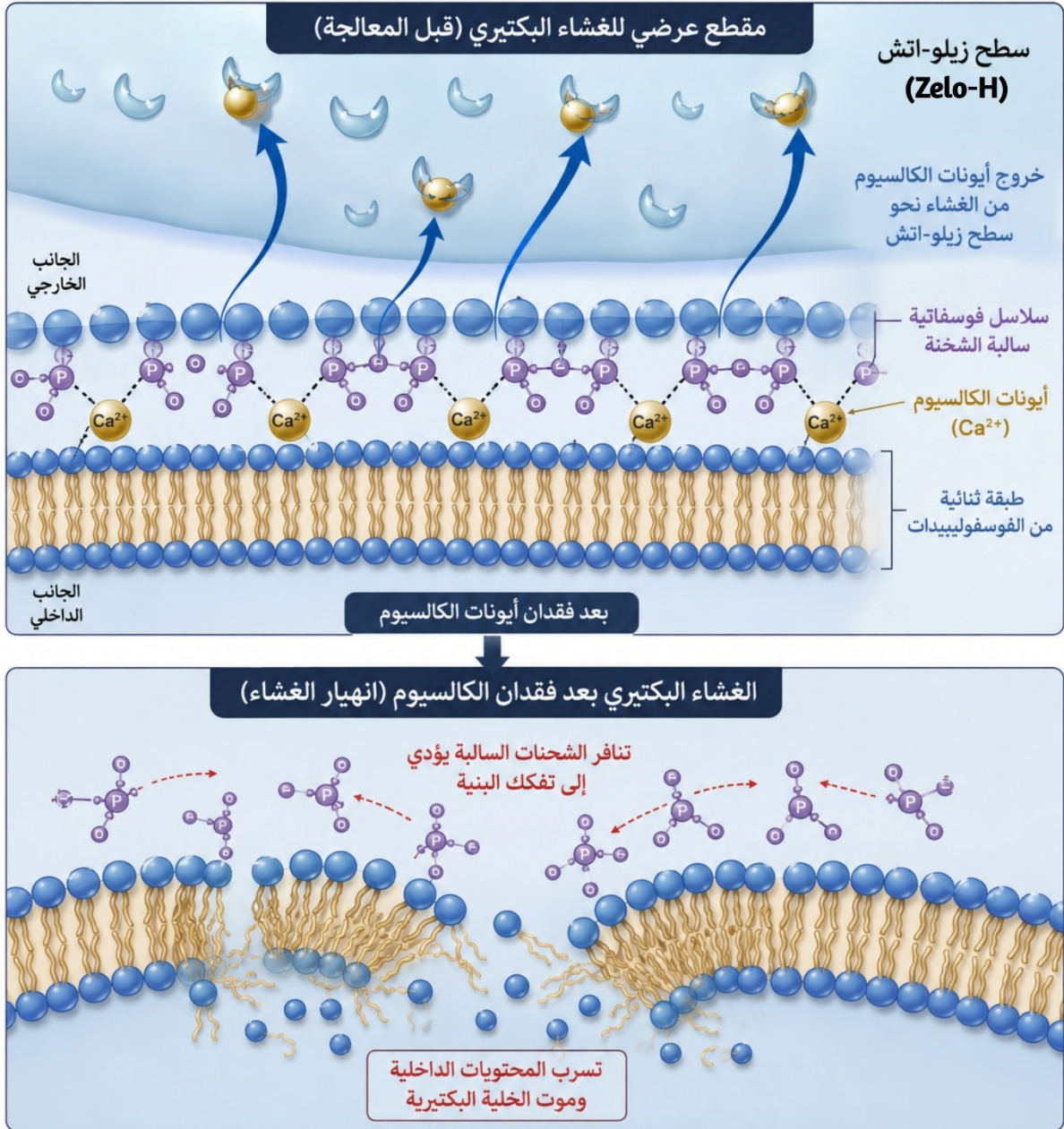
يحمل الغشاء البكتيري (A) شحنة سالبة طبيعية بسبب مجموعات الفوسفات وأحماض التيشويك. سطح زيلو-اتش (B) غني بالمجموعات الأيونية الموجبة. عند التلامس يحدث تجاذب كهروسكوني قوي (الأسهم البيضاء) يعمل كـ "مصيدة" تثبت البكتيريا على سطح المادة تمهيداً للمرحلة التالية.

### الخطوة الثانية: التبادل الأيوني وزعزعة استقرار الغشاء

هذه هي الخطوة الجوهرية. غشاء البكتيريا لا يحافظ على تماسكه إلا بوجود أيونات معدنية موجبة مثل الكالسيوم ( $Ca^{2+}$ ) والمغنيسيوم ( $Mg^{2+}$ ) التي تعمل كجسور تربط السلاسل السالبة للغشاء معاً، فتمنحه الصلابة والمرونة.

سطح زيلو-اتش النشط أيونياً لا يكفي باجتذاب البكتيريا، بل يبدأ عملية تبادل أيوني: فهو يسحب أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم الحيوية من الغشاء البكتيري ويمسكها بقوة داخل بنيته، مستبدلاً إياها بأيونات أخرى (مثل أيونات الصوديوم أو الهيدروجين) لا تمنح الغشاء الاستقرار نفسه.

والنتيجة: تفقد مناطق واسعة من الغشاء البكتيري الجسور الأيونية التي تمسكها، فتصبح هشّة وغير مستقرة.



شكل ٢: التبادل الأيوني وزعزعة استقرار الغشاء.

أعلى: أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم (+) تعمل كجسور رابطة بين السلاسل الفوسفاتية السالبة للغشاء، مما يمنحه الصلابة والمرونة.

وسط: سطح زيلو-اتش النشط يسحب هذه الأيونات الحيوية بقوة وينزعها من الغشاء عبر التبادل الأيوني.

أسفل: يؤدي فقدان الأيونات الجسرية إلى انهيار بنية الغشاء وانتقابه وتسرب المحتويات الخلوية، مما يسبب الموت البكتيري الفيزيائي.

## الخطوة الثالثة: التمزق الفيزيائي والموت

مع الاستمرار في فقدان الأيونات، يصل عدم استقرار الغشاء إلى نقطة الانهيار. ينتقب الغشاء الخلوي البكتيري وتتسرب محتوياته الحيوية (السيتوبلازم، البروتينات، الأحماض النووية) إلى الخارج. تموت البكتيريا فيزيائياً خلال دقائق دون تدخل أي عامل دوائي.

### ٣. لماذا يصعب على البكتيريا تطوير مقاومة ضد زيلو-اتش؟

تعتمد المقاومة البكتيرية للمضادات الحيوية على التطور الدارويني عبر تغيير الهدف الكيميائي الحيوي، وهذا ممكن لأن الهدف جزيء واحد أو مسار محدد. لكن زيلو-اتش يستهدف خاصيتين فيزيائيتين أساسيتين للغشاء البكتيري: شحنته السالبة واعتماده المطلق على أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم. هاتان الخاصيتان ليستا مجرد مسار استقلابي يمكن تعديله بسهولة، بل هما شرط لبقاء الخلية.

تغيير الشحنة السالبة الكلية للغشاء، أو الاستغناء عن الجسور الأيونية المعدنية، يتطلب إعادة تصميم جذرية لتركيب الغشاء. مع ذلك، من المهم الإقرار بأن البكتيريا تمتلك بعض آليات الدفاع التي قد تقلل من حساسيتها لهذه العوامل، مثل تعديل تركيبة الأحماض الدهنية في الغشاء، أو استخدام مضخات لطرد العوامل الكاتيونية. هذه الآليات مثبتة في مقاومة بعض المطهرات الكاتيونية. لذا، لا يمكن القول إن المقاومة "مستحيلة" تماماً، بل هي أصعب بكثير ولم تُسجَل سريرياً كظاهرة واسعة النطاق في هذا النوع من المضادات الأيونية حتى الآن. الاحتمالية الضئيلة لنشوء مقاومة هي ما يجعل هذا النهج واعدًا في زمن أزمة المضادات الحيوية.

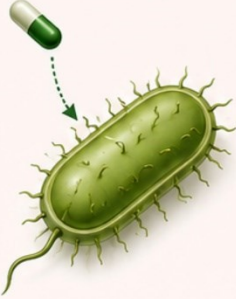
#### المقارنة المبسطة:

المعيار	المضاد الحيوي الكيميائي	زيلو-اتش (التبادل الأيوني)
طريقة القتل	تعطيل إنزيم معين أو مسار استقلابي	تمزيق فيزيائي للغشاء
هدف الهجوم	جزيء حيوي محدد	خاصية الشحنة السالبة والجسور الأيونية
إمكانية المقاومة	عالية (بتغيير الهدف)	منخفضة جداً (لاستهدافه بنية أساسية يصعب تغييرها جذرياً دون فقدان الصلاحية)
السرعة	تحتاج ساعات لأيام (لتعطيل النمو)	دقائق (تدمير مادي مباشر)

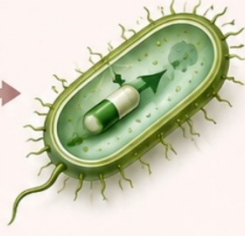
## المسار العلوي: مضاد حيوي يواجه مقاومة - لا يعمل



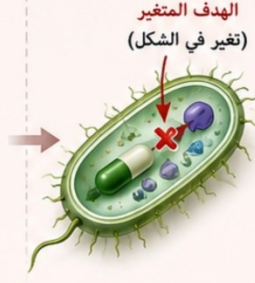
1 المضاد الحيوي يقترب من البكتيريا



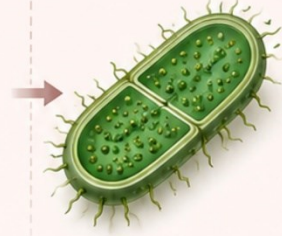
2 يدخل المضاد الحيوي إلى البكتيريا



3 يبحث عن الهدف (الموقع (لمراد تثبيته)



4 لا يرتبط الهدف المتغير بالمضاد الحيوي → لا يحدث تأثير (البكتيريا تستمر بالنمو)



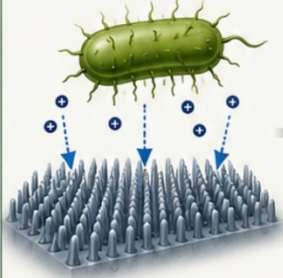
مقاومة المضادات الحيوية

تغيرات في الهدف داخل البكتيريا (أو مضخات إخراج / تقليل الدخول) تمنع المضاد الحيوي من الارتباط أو التأثير.

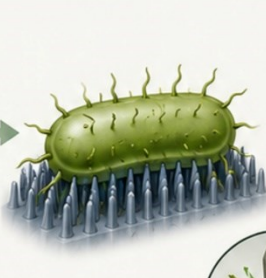
## المسار السفلي: سطح زيلو-اتش - يهاجم الغشاء مباشرة



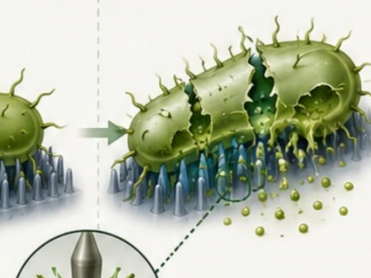
1 سطح زيلو-اتش يجذب البكتيريا



2 تلتصق البكتيريا بالسطح



3 سطح زيلو-اتش يمزق الغشاء الخلوي

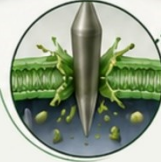


4 تنتسرب محتويات الخلية → تموت البكتيريا بسرعة



### آلية فيزيائية مباشرة

زيلو-اتش يهاجم الغشاء الخلوي فيزيائياً ولا يعتمد على هدف داخل البكتيريا → لا يمكن للبكتيريا تطوير مقاومة بسهولة.



لا هدف حيوي لا يوجد موقع محدد لتطوير مقاومة



تأثير فوري تمزق الغشاء يؤدي إلى موت سريع



صعب المقاومة آلية فيزيائية عامة ضد جميع البكتيريا



الفرق الجوهرى: المضادات الحيوية تبحث عن هدف يمكن أن يتغير، بينما زيلو-اتش يهاجم الغشاء مباشرة فلا تملك البكتيريا وسيلة سهلة للمقاومة.

(Zelo-H)

شكل ٣: لماذا يصعب تطوير المقاومة؟

المسار العلوي (المضاد الحيوي): يستهدف الدواء (A) إنزيمًا أو مستقبلًا محددًا (B). تستطيع البكتيريا تغيير شكل الهدف (C) فلا يرتبط به الدواء، فتتكاثر وتتكاثر.

المسار السفلي (زيلو-اتش): يجذب السطح الموجب (D) البكتيريا ويمزق غشائها ساحباً الأيونات الحيوية (E). الهدف هو خاصية فيزيائية كونية للغشاء يصعب تغييرها بالكامل دون أن تفقد البكتيريا صلاحيتها للحياة.

## ٤. الأدلة العلمية الداعمة

هذه الآلية تستند إلى مبادئ مثبتة في أدبيات مكافحة العدوى والأسطح المضادة للميكروبات:

- أوضح بييسر وتيلر (٢٠١١) في دراستهما عن الأسطح القاتلة بالتلامس أن الأسطح المطعمة ببوليمرات كاتيونية موجبة الشحنة تمزق الغشاء الخلوي البكتيري سالب الشحنة عبر آلية التبادل الأيوني وزعزعة الاستقرار الفيزيائي، وليس عبر تعطيل مسار استقلابي محدد. هذا يفسر انخفاض احتمالية تطور مقاومة ضدها.
- أظهرت دراسة بيرسيفال وآخرون (٢٠٠٧) في دورية Burns أن الضمادات المعتمدة على آليات أيونية (مثل إطلاق أيونات الفضة) قللت الحمل البكتيري في حروق الدرجة الثانية بنسبة كبيرة خلال ٢٤ ساعة، مما يؤكد فعالية هذا المبدأ الفيزيائي في بيئة الجرح الحقيقية.
- تجدر الإشارة أيضاً إلى أن المبادئ الفيزيائية المشابهة - كالجذب والتمزيق - تُستخدم في تطبيقات أخرى مثل البيبتيدات المضادة للميكروبات (AMPs) وبعض المطهرات الكاتيونية. ورغم تسجيل مقاومة محدودة ضد بعض المطهرات، تظل الآليات الفيزيائية أكثر استدامة من الآليات الكيميائية الحيوية الضيقة الهدف.

## ٥. الخلاصة والتطبيق العملي لزيلو-اتش

في وقت تتعاضم فيه أزمة مقاومة المضادات الحيوية، يبرز الابتكار الفيزيائي كخيار آمن وفعال. زيلو-اتش يستخدم حقيقة فيزيائية بسيطة - شحنة الغشاء وحاجته للأيونات - لتدمير البكتيريا بطريقة تجعل تطوير مقاومة كاملة ضدها أمراً بالغ الصعوبة.

هذا لا يعني الاستغناء عن المضادات الحيوية الجهازية في الحالات الشديدة، لكنه يعني أن تغطية الجروح والحروق بزيلو-اتش تمنع حدوث العدوى من الأساس، دون المساهمة الفاعلة في تفاقم أزمة المقاومة. إنه حل وقائي وعلاجي، آمن، ومستدام علمياً.

١. Bieser, A. M., & Tiller, J. C. (٢٠١١). Mechanistic considerations on contact-active antimicrobial surfaces based on immobilized polycations. *Macromolecular Bioscience*, ١١(٤), ٥٢٦-٥٣٤.
٢. Percival, S. L., Bowler, P. G., & Russell, D. (٢٠٠٧). A comparison of the antimicrobial efficacy of two silver-containing wound dressings. *Burns*, ٣٣(٣), ٣٦٩-٣٧٤.

## معلومات التواصل

أعدت هذه الورقة البحثية في إطار أنشطة البحث والتطوير لمنتج "زيلو-اتش". لمزيد من المعلومات حول الآلية العلمية، أو طلب النسخة الكاملة من التقرير التقني، أو الاستفسار عن إمكانيات التعاون البحثي، يُرجى التواصل عبر القنوات التالية:



### مؤسسة أبحاث الغذاء والدواء FDRF Food and Drug Research Foundation

الجهة البحثية: قسم الأبحاث والتطوير

البريد الإلكتروني: [info@fdrf.net](mailto:info@fdrf.net)

الهاتف: ٧٧١٤١٤٦٢٣ - ٧٨٠٤٤٤٤٧٢

الموقع الإلكتروني: <https://fdrf.net/>

فيسبوك: <https://www.facebook.com/FdrfYemen>

تيليجرام: <https://t.me/FdrfYemen>

العنوان: صنعاء - القصر مول - جوار السفارة الصينية



⚠️ تنويه: المعلومات الواردة في هذه الورقة مقدمة لأغراض علمية بحثية، ولا تُعدّ بديلاً عن الاستشارة الطبية المتخصصة. يخضع استخدام منتج زيلو-اتش للبروتوكولات السريرية المعتمدة وتقييم الطبيب المختص.

تاريخ الإصدار: 2026/5