الاليات البيوكيميائية للأنزيمات

الإنزيمات : Enzymes

هي جزيئات بروتينية (في الغالب) تعمل كمحفزات بيولوجية تُسرّع التفاعلات الكيميائية في الخلايا دون أن تُستهلك خلال العملية. تُسمى المواد التي يعمل عليها الإنزيم الركائز (Substrates،) حيث يرتبط بها الإنزيم في موقع نشط خاص (Active site) لتحويلها إلى نواتج.

والإنزيمات هي جزيئات حيوية ضخمة، غالبًا ما تكون بروتينات(ولكن بعضها يمكن أن يكون جزيئات RNA محفزة تسمى الريبوزومات)، تعمل كمحفزات بيولوجية. هذا يعني أنها تسرع بشكل كبير من معدل التفاعلات الكيميائية داخل الكائنات الحية دون أن تستهلك هي نفسها في العملية.

وتعرف الأنزيمات هي عبارة عن بروتينات تسرع التفاعلات الكيميائية في الأجهزة الحيوية فجميع التفاعلات الكيميائية للخلايا الحية قد تحدث ببطء شديد بدون الأنزيمات ، كما تعتبر هي النوع الثالث - بعد الفيتامينات والهرمونات - من المواد المساعدة الموجودة طبيعياً في الجسم وهي ذات أهمية حيوية ولا غنى عنها ، وتتميز بقدرتها العالية على التأثير في التفاعلات الحيوية حتى بكميات ضئيلة جداً من ناحية السرعة واتجاه التفاعل وذلك قبل التفاعلات الخاصة بتمثيل البروتينات والكربوهيدرات والدهون وتتأثر فعالية الأنزيمات كثيراً بدرجة الحرارة وحامضية أو قلوية الوسط.

تحتوي بلازما الدم على عدد كبير من الأنزيمات ذات تركيز يختلف باختلاف الحالة الفسيولوجية وهذه الأنزيمات التي تساعد على حدوث بعض تفاعلات العمليات الأيضية موزعة ومركزة أحياناً في خلايا خاصة وتكون

داخل أنسجة معينة مثل أنزيم CPK ، LDHوبعض هذه الأنزيمات تظهر في الدم كنتيجة طبيعية لموت وإزالة الخلايا المحتوية عليها

وفي حالات نقص الأنزيمات بصورة خلقية في الإنسان فإنها تسبب اضطرابات أيضية . ويحتوي الدم عامة على كميات قليلة من الأنزيمات التي تدخل في التفاعلات داخل الأنسجة وهذه الأنزيمات لا تنتشر عادة خارج الخلايا التي تعمل بها . ولا توجد الأنزيمات عادة في الدم ولكن في بعض الحالات المرضية من الممكن أن تظهر في الدم أو ربما يزيد تركيز الأنزيمات الموجودة عادة في الدم بكميات قليلة ويمكن أن يتغير المحتوى الأنزيمي للسوائل في جسم الإنسان بشكل له مَغذى في حالات مرضية معينة

وعليه فإن دراسة مستوى الأنزيمات في جسم الإنسان يساعد في التشخيص الإكلينيكي لبعض الأمراض ، ويعتبر مستوى نشاط الأنزيمات المؤكسدة (بالكبد والعضلات الإرادية) عموماً مرتفعاً في البرد وينخفض في الحر ، والأنزيمات عامة لها درجات حرارية قصوى تعمل فيها واختلاف الحرارة إما بالزيادة أو النقصان يقلل من نشاطها

وللأنزيمات عدة تسميات وتختلف كل تسمية عن الأخرى حسب وظيفتها من الأنزيمات الناقلة ، النازع للهيدروجين ، المحللة المؤكسدة ، المختزلة.

خصائص الانزيمات:

- **محفزات بيولوجية** :تزيد من سرعة التفاعلات الكيميائية .
- **بروتينات في معظمها** :تتكون من سلاسل من الأحماض الأمينية التي تتخذ أشكالاً ثلاثية الأبعاد مميزة .
- **متخصصة للغاية** :كل إنزيم عادة ما يحفز تفاعلًا كيميائيًا معينًا أو مجموعة صغيرة من التفاعلات .
- **ضرورية للحياة** :تلعب دورًا حيويًا في جميع العمليات الحيوية، مثل الهضم، الأيض، النمو، تخثر الدم، مكافحة الأمراض، والتنفس .

- **لا تستهلك في التفاعل** :تبقى الإنزيمات سليمة بعد التفاعل ويمكنها تحفيز تفاعلات أخرى .
- **تتأثر بالعوامل البيئية** :نشاطها يتأثر بدرجة الحرارة ودرجة الحموضة(pH) ، حيث تعمل ضمن نطاقات محددة لكل منها.

أنواع الإنزيمات: Types of enzymes

تصنف الإنزيمات إلى ستة أنواع رئيسية بناءً على نوع التفاعل الكيميائي الذي تحفزه، وفقًا للتصنيف الدولي: (التصنيف الوظيفي).

1. **إنزيمات الأكسدة والاختزال:(Oxidoreductases)**

- تحفز تفاعلات نقل الإلكترونات أو أيونات الهيدروجين من جزيء إلى آخر.
- تشمل الإنزيمات التي تؤكسد مادة وتختزل مادة أخرى.
- أمثلة: أوكسيداز(Oxidases) ، نازعات الهيدروجين.(Dehydrogenases)

2. **إنزيمات النقل:(Transferases)**

- تحفز نقل مجموعات كيميائية معينة (مثل مجموعة الفوسفات، الأمين، الميثيل) من جزيء إلى آخر.
- أمثلة: كيناز(Kinases) ، ترانس أميناز.(Transaminases)

3. **إنزيمات التحلل المائي:(Hydrolases)**

- تحفز تفاعلات التحلل المائي (أي كسر الروابط بإضافة الماء).
- مهمة في عمليات الهضم.
- أمثلة :

- **الأميليز (Amylase):** يهضم الكربوهيدرات المعقدة (النشا) إلى سكريات أبسط. يوجد في اللعاب والبنكرياس.
- **البروتياز (Protease):** يهضم البروتينات إلى أحماض أمينية. يوجد في المعدة (مثل البيبسين) والبنكرياس والأمعاء الدقيقة.
- **الليبيز (Lipase):** يهضم الدهون إلى أحماض دهنية وجليسرول. يوجد في البنكرياس.
- **المالتاز (Maltase):** يكسر سكر المالتوز إلى جلوكوز.
- **اللاكتيز (Lactase):** يهضم سكر اللاكتوز (سكر الحليب).

4. **إنزيمات الفصل/الحذف:(Lyases)**

- تحفز إزالة مجموعات من جزيئات الركيزة دون إضافة الماء، مما يؤدي غالبًا إلى تكوين روابط مزدوجة أو حلقات.
- أمثلة: فوماراز.(Fumarase)

5. **إنزيمات التشكل/ :(Isomerases)**

- تحفز إعادة ترتيب الذرات داخل الجزيء الواحد، مما يؤدي إلى تحويل مادة إلى أيزومر لها (شكل آخر بنفس التركيب الكيميائي ولكن بترتيب مختلف للذرات).
- أمثلة: فوسفو جلوكو أيزوميراز.(Phosphogluco isomerase)

6. **إنزيمات الربط/الليكيز:(Ligases)**

- تحفز ربط جزيئين معًا، عادةً ما يتطلب هذا التفاعل طاقة) عادة من.(ATP
- مهمة في عمليات التخليق الحيوي.
- أمثلة DNA :ليجيز (DNA ligase) في إصلاح الحمض النووي.

تصنيف الإنزيمات من حيث التركيب إلى:

- **إنزيمات بسيطة (Simple enzymes):** تتكون كليًا من البروتينات (سلاسل من الأحماض الأمينية).
- **إنزيمات مرتبطة (Conjugated enzymes):** تتكون من جزء بروتيني يسمى (Apoenzyme) جزء غير بروتيني يسمى العامل المساعد أو(Co-factor/Coenzyme ،) وهذا الجزء غير البروتيني ضروري لنشاط الإنزيم.

فسيولوجيا الإنزيمات: Enzyme physiology

هي دراسة كيفية عمل الإنزيمات في الأنظمة الحيوية، ودورها الحيوي في الحفاظ على الحياة. الإنزيمات هي محفزات حيوية، ومعظمها بروتينات(بعضها جزيئات RNA تسمى الريبوزيمات)، وهي ضرورية لجميع التفاعلات الكيميائية تقريبًا في الجسم.

حيث تلعب الإنزيمات دورًا فسيولوجيًا حيويًا في تنظيم جميع العمليات الكيميائية في الجسم، مما يجعلها ضرورية للحياة والصحة. فهم فسيولوجيا الإنزيمات يساعد في فهم الأمراض وتطوير الأدوية والعلاجات.

الوظيفة الأساسية للإنزيمات: The primary function of enzymes

- **تحفيز التفاعلات الكيميائية:** تعمل الإنزيمات على تسريع معدل التفاعلات الكيميائية بشكل كبير دون أن تستهلك في هذه التفاعلات. تفعل ذلك عن طريق خفض طاقة التنشيط اللازمة لبدء التفاعل. بدون الإنزيمات، ستكون معظم التفاعلات الكيميائية في الجسم بطيئة جدًا بحيث لا يمكنها دعم الحياة.
- **التخصص:** تتميز الإنزيمات بدرجة عالية من التخصص. كل إنزيم مصمم لتحفيز تفاعل كيميائي معين أو مجموعة من التفاعلات المترابطة. وهذا التخصص نابع من تركيبها ثلاثي الأبعاد المميز، والذي يسمح لها بالارتباط بركيزة (أو ركائز) محددة في موقع يسمى "الموقع النشط.

- **التحكم في العمليات الحيوية**: تتحكم الإنزيمات في آلاف التفاعلات الكيميائية الحيوية التي تحدث في الجسم يوميًا، بما في ذلك :
  - **الهضم**: تقوم الإنزيمات بتحليل الجزيئات الكبيرة من الطعام (مثل الكربوهيدرات والبروتينات والدهون) إلى جزيئات أصغر يمكن للجسم امتصاصها والاستفادة منها.
  - **الأيض**: تشارك الإنزيمات في جميع عمليات الأيض، بما في ذلك إنتاج الطاقة (التنفس الخلوي)، وبناء الجزيئات المعقدة (البناء)، وتكسيرها (الهدم).
  - **نسخ الحمض النووي (DNA) وانقسام الخلايا**: تساعد الإنزيمات في فك لولب الحمض النووي وتكوين نسخ جديدة منه أثناء انقسام الخلايا.
  - **نقل الإشارات الخلوية**: تلعب الإنزيمات دورًا في نقل الإشارات داخل وخارج الخلايا، وهو أمر حيوي لتنظيم الوظائف الخلوية.
  - **إزالة السموم**: تساعد إنزيمات الكبد في تكسير وإزالة السموم من الجسم.
  - **إنتاج الهرمونات ووظائف العضلات والأعصاب**: تشارك الإنزيمات في هذه العمليات الحيوية وغيرها الكثير.

آلية عمل الإنزيمات: Mechanism of action of enzymes

1. **الارتباط بالركيزة**: يرتبط الإنزيم بالركيزة (المادة التي سيتفاعل معها) في منطقة محددة تسمى "الموقع النشط". شكل الموقع النشط يكون مكملاً لشكل الركيزة، مما يضمن التخصص العالي للإنزيم.
2. **تكوين معقد الإنزيم-الركيزة (ES)**: عندما ترتبط الركيزة بالإنزيم، يتكون مركب مؤقت يسمى معقد الإنزيم-الركيزة.

3. **التحفيز** :يقوم الإنزيم بتحفيز التفاعل الكيميائي، مما يقلل من طاقة التنشيط المطلوبة. يمكن للإنزيم أن يفعل ذلك عن طريق توجيه الركائز في الوضع الأمثل للتفاعل، أو عن طريق إجهاد الروابط داخل الركيزة، أو عن طريق توفير بيئة كيميائية مواتية.
4. **إطلاق النواتج** :بعد اكتمال التفاعل، تتحرر النواتج من الموقع النشط للإنزيم.
5. **إعادة استخدام الإنزيم** :يعود الإنزيم إلى شكله الأصلي بعد التفاعل، ويكون جاهزًا لتحفيز تفاعل آخر مع جزيء ركيزة جديد. الإنزيمات لا تستهلك في التفاعل، وبالتالي يمكن إعادة استخدامها مرارًا وتكرارًا.

العوامل المؤثرة على نشاط الإنزيم:

تتأثر فعالية الإنزيم بعدة عوامل، منها:

- **درجة الحرارة** :لكل إنزيم درجة حرارة مثلى يعمل عندها بأقصى كفاءة. ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة بشكل كبير عن الدرجة المثلى يمكن أن يؤدي إلى تغيير شكل الإنزيم (تغير طبيعة البروتين) وفقدان وظيفته.
- **درجة الحموضة (pH)**: لكل إنزيم درجة حموضة مثلى. التغيرات الكبيرة في درجة الحموضة يمكن أن تؤثر على الشحنات الكهربائية على الإنزيم وتغير شكله، مما يقلل من نشاطه أو يوقفه تمامًا.
- **تركيز الركيزة** :تزداد سرعة التفاعل بزيادة تركيز الركيزة حتى يصل الإنزيم إلى نقطة التشبع، حيث تكون جميع المواقع النشطة مشغولة، وبعدها يثبت معدل التفاعل.
- **تركيز الإنزيم** :كلما زاد تركيز الإنزيم (مع وجود ركيزة كافية)، زادت سرعة التفاعل.
- **المثبطات والمنشطات** :بعض الجزيئات يمكن أن ترتبط بالإنزيم وتؤثر على نشاطه. المثبطات تقلل من نشاط الإنزيم، بينما المنشطات تزيده.

- **العوامل المساعدة (Coenzymes and Cofactors):** تحتاج بعض الإنزيمات إلى جزيئات غير بروتينية إضافية (مثل الفيتامينات أو الأيونات المعدنية) لتكون نشطة بشكل كامل.

أمثلة شائعة على الإنزيمات:

1- الإنزيمات الهاضمة: Digestive enzymes

- **الأميليز (Amylase):** يوجد في اللعاب والبنكرياس والأمعاء الدقيقة. يقوم بتحويل النشويات (الكربوهيدرات المعقدة) إلى سكريات بسيطة مثل الجلوكوز.
- **المالتاز (Maltase):** يوجد في اللعاب، ويقوم بتكسير سكر المالتوز إلى جلوكوز.
- **البروتياز (Protease):** يوجد في المعدة والبنكرياس والأمعاء الدقيقة. يقوم بتكسير البروتينات إلى أحماض أمينية. أمثلة على البروتياز :
  - **البيبسين (Pepsin):** يعمل في المعدة على هضم البروتينات.
  - **التربسين (Trypsin):** يعمل في الأمعاء الدقيقة على تحليل البروتينات.
- **الليباز (Lipase):** يفرز بشكل أساسي من البنكرياس، بالإضافة إلى كميات قليلة في الفم والمعدة. يقوم بتكسير الدهون إلى أحماض دهنية وجلسرين.
- **السكراز (Sucrase):** يوجد في الأمعاء الدقيقة، ويفكك السكروز إلى جلوكوز وسكر الفاكهة.
- **اللاكتاز (Lactase):** يقوم بتحليل اللاكتوز (سكر الحليب) إلى كلوكوز وكلاكتوز. نقص هذا الإنزيم يسبب عدم تحمل اللاكتوز.

شكل بعض الانزيمات الهاضمة

2- إنزيمات الحمض النووي:(DNA/RNA)

- **هيليكاز :(Helicase)** يعمل على فصل سلاسل الحمض النووي (DNA) تمهيدًا لتناسخها أو إصلاحها.
- **دنا بوليميريز :(DNA polymerase)** يساهم في تصنيع الحمض النووي.
- **رايبونكليز :(Ribonuclease)** يعمل كمضاد للفيروسات عن طريق تكسير الحمض النووي الريبوزي (RNA).
- **إنزيمات القطع :(Restriction enzymes)** تستخدم في الهندسة الوراثية لقطع الحمض النووي في تسلسلات محددة مثل .(EcoRI)

3- إنزيمات أخرى في الجسم:

- **رينين :(Renin/Chymosin)** يستخدم في تصنيع الجبن لتحليل البروتين في الحليب.
- **أسباراجيناز :(Asparaginase)** يستخدم في علاج بعض أنواع سرطان الدم.

- **رودانيز (Rhodanese):** يستخدم في حالات التسمم بالسيانيد.
- **هيالورونيداز (Hyaluronidase):** يستخدم في حالات النوبات القلبية.
- **ألفا-أميليز (Alpha-Amylase):** يستخدم كمضاد للالتهابات.
- **LDH (Lactate Dehydrogenase):** يلعب دورًا في تحويل حمض البايروفيك إلى حمض اللاكتيك في عملية الأيض

تأثير التدريب الرياضي على وظيفة الانزيمات:

يلعب التدريب الرياضي دوراً محورياً في تعديل نشاط الإنزيمات، مما يؤدي إلى تكيفات فسيولوجية تعزز قدرة الجسم على الأداء، وتحسين استخدام مصادر الطاقة، وحماية الخلايا من الإجهاد.

ويؤثر **التدريب الرياضي** بشكل كبير على عمل الإنزيمات في الجسم، وهذا التأثير حيوي لتحسين الأداء الرياضي والتكيف الفسيولوجي. يمكن تلخيص هذا التأثير في عدة نقاط رئيسية:

1- زيادة نشاط إنزيمات التمثيل الغذائي (الأيض)

- **إنزيمات إنتاج الطاقة:**

التدريب الرياضي، خاصة تدريبات التحمل، يزيد من نشاط الإنزيمات المشاركة في مسارات إنتاج الطاقة، مثل دورة كربيس (Citric Acid Cycle) وسلسلة نقل الإلكترون (Electron Transport Chain). هذا يشمل إنزيمات مثل سيترات سينثاز (Citrate Synthase) ومالات ديهيدروجيناز (Malate Dehydrogenase) مما يعزز قدرة العضلات على استخدام الأكسجين لإنتاج الطاقة (الأيض الهوائي).

- إنزيمات تحلل الكلوكوز: (Glycolysis):

التدريب الرياضي يمكن أن يؤثر أيضاً على الإنزيمات المسؤولة عن تحلل الكلوكوز (الكليكوليز)، مثل **فوسفوفركتوكيناز(Phosphofructokinase - PFK)** ، مما يزيد من قدرة العضلات على إنتاج الطاقة بسرعة في غياب الأكسجين الكافي (الأيض اللاهوائي).

- **إنزيمات أكسدة الدهون :**

يعمل التدريب الرياضي على زيادة نشاط الإنزيمات التي تحفز أكسدة الأحماض الدهنية، مثل **بيتا-هيدروكسي أسيل CoA ديهيدروجيناز(β-HAD)** ، مما يعزز استخدام الدهون كمصدر للطاقة أثناء التمرين، خاصة في الأنشطة طويلة الأمد.

2- زيادة نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة:

- يؤدي التمرين الرياضي، خاصة الشديد، إلى زيادة في إنتاج **الجذور الحرة Reactive Oxygen Species - ROS)** في الجسم. كرد فعل تكيفي، يزيد التدريب الرياضي المنتظم من مستويات ونشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل :
  - **ديسميوتاز الفائق (Superoxide Dismutase - SOD)**
  - **الكاتالاز (Catalase)**
  - **كلوتاثيون ريدكتاز (Glutathione Reductase)** هذه الإنزيمات تساعد في حماية الخلايا العضلية والأنسجة الأخرى من التلف الناتج عن الإجهاد التأكسدي، مما يساهم في التعافي وتحسين الأداء على المدى الطويل.

3- ارتفاع مستويات إنزيمات العضلات في الدم (كمؤشر على تلف العضلات)

- بعد التمرين الشديد أو غير المعتاد، خاصة الأنشطة التي تتضمن انقباضات عضلية غريبة (مثل الركض نزولاً أو رفع الأثقال)، قد تزداد مستويات بعض الإنزيمات في الدم بشكل مؤقت، مثل :
  - **كرياتين كيناز :(Creatine Kinase - CK)** هو مؤشر شائع لتلف العضلات. تزداد مستوياته بشكل كبير بعد التمرين الشديد وتصل إلى ذروتها بعد 24 ساعة.
  - **أسبارتات أمينوترانسفيراز (Aspartate Aminotransferase - AST)** و**ألانين أمينوترانسفيراز :(Alanine Aminotransferase - ALT)** على الرغم من أن هذه الإنزيمات تُعرف عادةً بكونها مؤشرات لوظائف الكبد، إلا أنها توجد أيضاً في العضلات ويمكن أن تزداد مستوياتها في الدم نتيجة لتلف العضلات الناتج عن التمرين.

- **لاكتات ديهيدروجيناز (Lactate Dehydrogenase - LDH):** يمكن أن ترتفع مستوياته أيضاً بعد التمرين الشديد.

- هذه الزيادات تشير إلى درجة من التلف الخلوي في الألياف العضلية، وتكون أكبر لدى الأفراد غير المدربين مقارنة بالرياضيين المدربين. مع التكيف مع التدريب، تقل هذه الارتفاعات مع مرور الوقت.

4- التكيف الإنزيمي الخاص بنوع التدريب:

- يختلف تأثير التدريب على الإنزيمات بناءً على نوع التمرين :

- **تدريبات التحمل (Endurance Training):** تزيد من نشاط الإنزيمات الهوائية (الخاصة بإنتاج الطاقة بالأكسجين) في العضلات، مما يحسن قدرة التحمل ويؤخر التعب.
- **تدريبات القوة (Strength Training):** قد تؤثر على الإنزيمات المتعلقة بتضخم العضلات وعمليات الإصلاح، ولكن تأثيرها على الإنزيمات الأيضية قد يكون أقل وضوحاً مقارنة بتدريبات التحمل.
- **التدريب على الارتفاعات (Altitude Training):** يؤدي إلى تكيفات أيضية، حيث يعزز الجسم من الاعتماد على دورة حمض الستريك (TCA cycle) وقد يؤثر على نشاط إنزيمات الكليكوليز استجابة لنقص الأكسجين.

5- العوامل التدريب المؤثرة في الانزيمات:

تعتمد درجة تأثير التدريب الرياضي على الإنزيمات على عدة عوامل:

- **شدة ومدة التمرين:** كلما زادت الشدة والمدة، زاد التأثير على مستويات الإنزيمات.
- **حالة التدريب للفرد:** يميل الأفراد غير المدربين إلى إظهار ارتفاعات أكبر في إنزيمات تلف العضلات مقارنة بالمدربين.

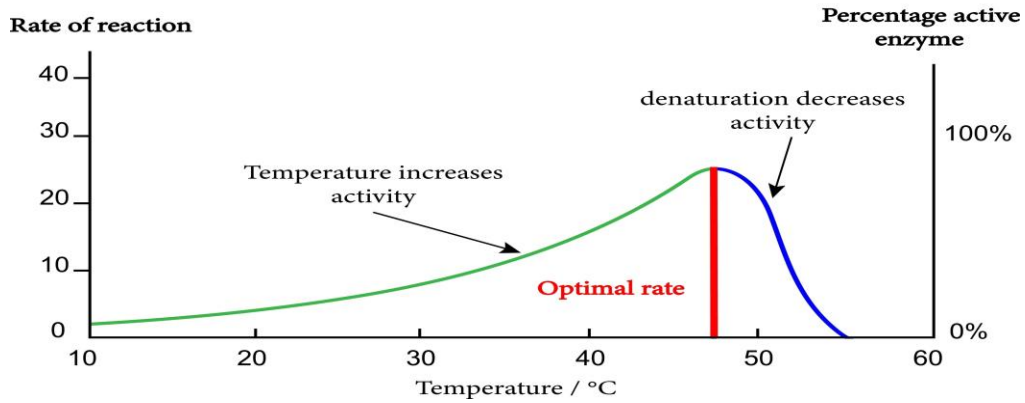
- **الجنس والعرق والعمر** :قد تختلف الاستجابات الإنزيمية أيضاً بناءً على هذه العوامل.حسب نوع الجنس وعمر الرياضي وكذلك العرق.

العوامل التي توثرفي الانزيمات:

1- درجة الحرارة(Temperature)

تؤثر درجة الحرارة بشكل كبير على نشاط الإنزيمات:

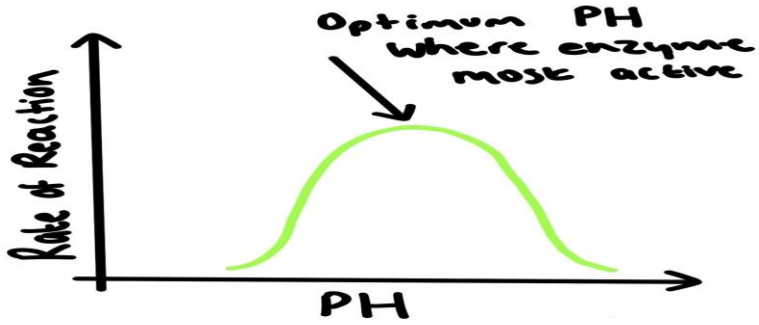
- **درجات الحرارة المنخفضة :تؤدي إلى نقصان كبير في سرعة التفاعل نتيجة لقلة الطاقة الحركية لجزيئات الإنزيم والمادة المتفاعلة (الركيزة)، مما يقلل من فرص التصادم بينهما وارتباطهما بالموقع النشط. هذا التأثير يكون عكوسًا (Reverse)، حيث يمكن للإنزيم استعادة نشاطه عند العودة إلى درجة الحرارة المثلى.**
- **درجة الحرارة المُثلى :(Optimum Temperature) هي درجة الحرارة التي يكون عندها نشاط الإنزيم أعلى ما يمكن (أقصى سرعة للتفاعل). لمعظم إنزيمات جسم الإنسان، تتراوح هذه الدرجة بين 35 - 40 درجة مئوية**
- **درجات الحرارة المرتفعة :تؤدي إلى تكسير الروابط الكيميائية الضعيفة التي تحافظ على البنية الفراغية ثلاثية الأبعاد للإنزيم، خاصةً في الموقع النشط. هذا التغير في الشكل يُعرف بـ تَمَشْوُه (Denaturation)أو تخريب طبيعة الإنزيم، مما يجعله غير قادر على الارتباط بالركيزة، ويكون هذا التغير غير عكوس (Irreversible)في الغالب.**



2- الرقم الهيدروجيني:(pH)

لكل إنزيم رقم هيدروجيني خاص يعمل عنده بأفضل كفاءة:

- الرقم الهيدروجيني الأمثل :(Optimum pH) هي قيمة الـ {pH} التي يكون عندها نشاط الإنزيم جيدا : يختلف هذا الرقم من إنزيم لآخر حسب بيئة عمله؛ فمثلاً:
  - إنزيم البيبسين في المعدة يعمل في وسط حامضي)حوالي .($2 = {pH}
  - إنزيم الأميلاز في الفم يعمل في وسط متعادل)حوالي .($7 = {pH}
  - إنزيم التربسين في الأمعاء الدقيقة يعمل في وسط قاعدي/قلوي)حوالي $8 = {pH} .
- التغير عن القيمة المُثلى :أي تغير في الـ pHصعودًا أو نزولًا عن القيمة المثلى يؤثر على الحالة الأيونية للمجموعات الكيميائية)مثل مجموعات الأمين والكربوكسيل) الموجودة في الأحماض الأمينية التي تكون الموقع النشط، مما يغير من شحنة الإنزيم ويؤثر على بنيته الفراغية وقدرته على الارتباط بالركيزة، وبالتالي يقل نشاط الإنزيم .



3-تركيز المواد المتفاعلة (الركيزة) والإنزيم

- تركيز المادة المتفاعلة:(Substrate Concentration)
  - في البداية، تزداد سرعة التفاعل الإنزيمي بزيادة تركيز الركيزة (علاقة طردية)، بسبب زيادة فرص تصادم جزيئات الركيزة مع الموقع النشط للإنزيم.

- عند حد معين، يصل التفاعل إلى أقصى سرعة له (V_{max})، لأن جميع المواقع النشطة للإنزيمات تصبح مشبعة بجزيئات الركيزة. زيادة تركيز الركيزة بعد هذه النقطة لا تزيد من سرعة التفاعل، ويصبح تركيز الإنزيم هو العامل المُحدِّد.

- **تركيز الإنزيم:(Enzyme Concentration)**

- تزداد سرعة التفاعل الإنزيمي بشكل طردي مع زيادة تركيز الإنزيم، بشرط أن تكون المادة المتفاعلة (الركيزة) متوفرة وبوفرة كافية. كلما زاد عدد جزيئات الإنزيم، زاد عدد المواقع النشطة المتاحة لتحفيز التفاعل في نفس الوقت.

4- المثبطات والمنشطات(Inhibitors and Activators)

- المثبطات :(Inhibitors) هي مواد كيميائية تقلل أو توقف نشاط الإنزيم. قد ترتبط هذه المثبطات:
  - بالموقع النشط (تثبيط تنافسي).
  - بموقع آخر على الإنزيم يغير من شكل الموقع النشط (تثبيط لا تنافسي).
- العوامل المرافقة (Cofactors) والمنشطات :(Activators) هي جزيئات غير بروتينية (مثل بعض الأيونات المعدنية أو الفيتامينات) ضرورية لبعض الإنزيمات لتكون نشطة، حيث ترتبط بها وتساعدها على أداء وظيفتها التحفيزية.

آليات التكيف الإنزيمي الرئيسية:

تعتمد آليات التكيف الإنزيمي على نوع وشدة ومدة التمرين الرياضي، وتحدث بشكل أساسي في الخلايا العضلية. يمكن تقسيم هذه التكيفات حسب أنظمة الطاقة التي تتأثر بها:

1- التكيف مع التمارين الهوائية(Aerobic Exercise Adaptations)

تحدث هذه التكيفات بشكل رئيسي لزيادة القدرة على استخدام الأكسجين لإنتاج الطاقة (الأيض المؤكسد)، وتظهر في رياضة التحمل مثل الجري لمسافات طويلة والسباحة.

- **زيادة الإنزيمات المؤكسدة الميتوكوندريالية:**

- الآلية :يؤدي التدريب الهوائي المتكرر إلى زيادة في عدد وحجم الميتوكوندريا (مصانع الطاقة في الخلية).
- الإنزيمات المتأثرة :تزداد مستويات نشاط الإنزيمات المرتبطة بدورة كريبس)مثل سيتريت سينثاز (Citrate Synthase - وسلسلة نقل الإلكترون)مثل سيتوكروم أوكسيداز - Cytochrome Oxidase).
- النتيجة :تحسين قدرة العضلة على أكسدة الكربوهيدرات والدهون لإنتاج كميات كبيرة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين(ATP) ، مما يؤخر التعب.

- **زيادة إنزيمات أكسدة الأحماض الدهنية:**

- الآلية :تزيد قدرة العضلات على استخدام الدهون كمصدر للطاقة.
- الإنزيمات المتأثرة :تزداد إنزيمات مثل بيتا هيدروكسي أسيل نازع الهيدروجين-β) Hydroxyacyl Dehydrogenase)المسؤولة عن عملية أكسدة بيتا (Beta-oxidation) للأحماض الدهنية.
- النتيجة :توفير الجليكوجين العضلي (Glycogen Sparing) لاستخدامه لاحقًا، مما يزيد من القدرة على التحمل.

2- التكيف مع التمارين اللاهوائية(Anaerobic Exercise Adaptations)

تحدث هذه التكيفات لزيادة القدرة على إنتاج الطاقة بسرعة دون الحاجة إلى الأكسجين، وتظهر في رياضات القوة والسرعة مثل رفع الأثقال والركض السريع (العدو).

- **زيادة إنزيمات نظام الفوسفاكيرياتين:(ATP-PCr System)**

- الآلية :يتم تحفيز زيادة في الإنزيمات المسؤولة عن تجديد الـ ATPالسريع من مخزون فوسفات الكرياتين.(PCr)
- الإنزيمات المتأثرة :يزداد نشاط إنزيم كرياتين كيناز.(Creatine Kinase)
- النتيجة :زيادة سرعة وفعالية إنتاج الطاقة في أول 10-15 ثانية من الجهد الأقصى.

- **زيادة إنزيمات التحلل السكري اللاهوائي:(Anaerobic Glycolysis)**

- **الآلية :يزيد التدريب اللاهوائي المكثف من قدرة العضلة على تكسير الجلوكوز/الجليكوجين بسرعة لإنتاج ATPوحمض اللاكتيك.**

- **الإنزيمات المتأثرة :تزداد مستويات إنزيمات التحلل السكري مثل فوسفوفروكتوكيناز (Phosphofructokinase - PFK)، وهو إنزيم منظم رئيسي، ولاكتات نازع الهيدروجين (Lactate Dehydrogenase - LDH).**

- **النتيجة :زيادة القدرة على تحمل الجهد عالي الشدة لفترات قصيرة إلى متوسطة (30 ثانية إلى دقيقتين).**

المقارنة بين إنزيمات الكرياتين كيناز (CPK) واللاكتات ديهيدروجيناز(LDH)

تُعدّ إنزيمات الكرياتين كيناز (CPK) واللاكتات ديهيدروجيناز (LDH) من المؤشرات الحيوية الهامة في تقييم الأداء الرياضي والاستجابة للجهد العضلي، على الرغم من أن لكل منهما دورًا ووظيفة مختلفة.

المقارنة بين

- إنزيم CPK هو في المقام الأول علامة على سلامة بنية العضلة .كلما زاد تلف الخلايا العضلية نتيجة الجهد، تسرب الإنزيم إلى الدم، مشيرًا إلى ضرر عضلي يتطلب فترة استشفاء أطول.
- إنزيم LDH هو مؤشر على نشاط مسارات الطاقة اللاهوائية .يرتبط ارتفاعه بزيادة الاعتماد على تحلل الجلوكوز اللاهوائي، وهو أمر شائع في التمارين السريعة والقوية (مثل سباق 400 متر أو تدريبات المقاومة العالية).

بشكل عام، غالبًا ما يُقاس كلا الإنزيمين معًا لمساعدة المدربين والرياضيين على فهم التأثير الكامل لبرنامج تدريبي معين:

1. ارتفاع) CPK دون ارتفاع LDH كبير :(قد يشير إلى ضرر عضلي ناتج عن جهد جديد أو غير معتاد (مثل الانقباضات اللامركزية المكثفة)، مما يستدعي تعديل الحِمل أو زيادة فترة الاستشفاء.

2. ارتفاع) LDH دون ارتفاع CPK كبير :(قد يشير إلى استجابة أيضية قوية للجهد اللاهوائي، مما يدل على أن العضلات تعمل بكفاءة في نظام الطاقة اللاهوائي، وقد يكون مؤشراً جيداً للتكيف في رياضات السرعة والتحمل القصير.

3. ارتفاع كلاهما :يشير إلى جهد شديد يجمع بين الضرر الهيكلي والإجهاد الأيضي العالي.