**منظومات اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين (أنظمة الطاقة)**

1- **منظومة المركبات الفوسفاتية ذات الطاقة العالية :**

يحتوي الليف العضلي من بين ما يحتوي على مركبات فوسفاتية مختلفة رغم ان نسبة المركبات تختلف في أهميتها ودورها في الليف العضلي إلا أنها تشترك بصفة مشتركة استهلاكها طاقة كيميائية مخزونة عالية وتكمن هذه الطاقة في الرابطة التي تربط مجموعة الفوسفات بالمركب الفوسفاتي المعني علماً من ان هذه المركبات تتباين في تراكيزها داخل الخلية وهناك اشارات في الادبيات الى ان للتدريب الرياضي تأثيراً على هذا التركيز وعلينا ان نذكر أن أكثر هذه المركبات أهمية ولما يتعلق بالطاقة هي ثلاثي فوسفات الادينوسين (ATP) وثنائي فوسفات الادينوسين (ADP) وأحادي فوسفات الادينوسين (AMP) وفوسفات الكرياتين (CP).

كما ذكرنا ان هذا المركب هو المصدر الوحيد والمباشر للطاقة الحركية ويكمن السبب في ذلك في ان الانزيم الخاص بتحليل هذا المركب (ATPase) مبني تركيبياً في رؤوس المايوسين. فمع بداية الحركة يتحلل هذا المركب حسب المعادلة التالية :

ATP\_\_\_\_atp ase\_\_\_\_\_\_ ADP +Pi +طاقة

ويمكن معرفته من المعادلة هو ان تحلل هذا المركب يؤدي الى ظهور المركب الفوسفاتي ذو الطاقة العالية ثنائي فوسفات الادينوسين وفوسفات غير عضوي (حر) وطاقة يتحول جزءاً منها الى طاقة حركية والجزء الكبر منها الى طاقة حرارية. تكرار تحلل المركب ثلاثي فوسفات الادينوسين وامتلاكنا تخزين محدود يؤدي الى نفاذ هذا المركب في العضلة ولكن حقيقة الامر غير ذلك حيث وعلى الرغم من ان ثلاثي فوسفات الادينوسين هو المصدر الوحيد للطاقة الحركية الا ان تركيزه يحاول الجسم المحافظة عليه وانه اي التركيز لا يتأثر الا القليل حتى بعد التمرين البدني العنيف ويحافظ الليف على تركيز هذا المركب بالاعتماد على المركبات الفوسفاتية الاخرى والحقيقة هناك عدة منظومات لذلك أشهرها :

**1- منظومة فوسفات الكرياتين : Creatine Phosphate**

فوسفات الكرياتين هو احد المركبات الفوسفاتية ذات الطاقة العالية حيث يخزن هذا المركب شأنه شأن بقية المركبات الفوسفاتية هذه في الليف العضلي علما من ان هذا الخزين يصل الى أكثر من ضعفي خزين الليف العضلي من ثلاثي فوسفات الادينوسين وان هناك اشارات في الادبيات الى ان هذا الخزين يتأثر بالتدريب ولكن هذا التأثير وليومنا هذ جدلي. تتلخص هذه المنظومة بانتقال الطاقة الكيميائية العالية من فوسفات الكرياتين الى المركب ثنائي فوسفات الادينوسين واعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسينوتراكم للمركب الكرياتين والمعادلة الكيميائية لهذا التفاعل هي :

CP + ADP \_\_cpk ase \_\_\_\_\_\_\_ C + ATP

علما من ان الانزيم الذي ينظم او يسيطر على هذا التفاعل هو كرياتين كاينيز او كرياتين فوسفوكاينيز (Creatine Phosphokinase) والذي عرفنا وجوده كأحد بروتينات الخط M في الساركوير وان نشاط هذا الانزيم يرتبط بتحليل المركب ثلاثي فوسفات الادينوسين حيث ينخفض تركيز فوسفات الكرياتين وبصورة خطية تقريباً مع القوة الانفجارية للتمارين الديناميكية ومع القوة القصوى للتمارين الثابتة.

**2- منظومة ثنائي فوسفات الادينوسين (Adenosine Di Phosphate)**

عرفنا أن ثنائي فوسفات الادينوسين هو مركب فوسفاتي ذو طاقة عالية وبتراكم هذا المركب من تحلل ثلاثي فوسفات الادينوسين تكون هناك امكانية في اعادة بناء ثلاثي الفوسفات عن طريق نقل الطاقة الكيميائية العالية في هذا المركب ثنائي الفوسفات الى مركب آخر من ثنائي فوسفات الادينوسين وليتكون ثلاثي فوسفات الادينوسين واحادي فوسفات الادينوسين حسب المعادلة التالية

ADP + ADP \_\_\_\_\_\_MK ase\_\_\_ ATP + AMP

علما من ان الانزيم الذي يتحكم بهذا التفاعل هو الانزيم مايوكاينيز (Myokinase)

**3- منظومة احادي فوسفات الادينوسين (Adenosine Mono Phosphate)**

كذلك عرفنا ان احادي فوسفات الادينوسين هو مركب فوسفاتي ذو طاقة عالية يتراكم من منظومة ثنائي فوسفات الادينوسين لاعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين ويمكن اعادة بناء ثلاثي الفوسفات من احادي الفوسفات بنقل الطاقة الكيميائية العالية من احادي فوسفات الادينوسين الى ثنائي فوسفات الادينوسين لتكوين ثلاثي فوسفات الادينوسين وتراكم الادينوسين حسب المعادلة التالية :

AMP + ADP \_\_\_\_\_\_\_ ATP+ A.

علما من ان هناك اشارات حديثة تشير الى امكانية تحول الت AMP وعن طريق الانزيم محلل المجموعة الامينية من المركب احادي فوسفات الادينوسين (AMP deaminase) الى IMP وتكون الامونيا والتي تنتقل من العضلة الى الدم ولكن حدد هذا التفاعل بالاركاض المتوسطة الشدة او الشدد التمرينية المتوسطة والتي يلعب فيها نظام تحلل الكلايكوجين اللاهوائي (كما سنرى لاحقا) الدور الرئيسي وعليه ارتبط هذا النظام بظهور الأمونيا في الدم.

بعد ان تم تقديم هذه المنظومات الفوسفاتية لابدان نتطرق الى مميزات هذه المنظومات والتي عرفت تقليدياً بنظام الفوسفاجين اي مولد الفوسفات لتراكم الفوسفات في الليف العضلي وابرز ما يميز هذا النظام هو السرعة الهائلة التي يمكن معها اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين حيث تمثل اكبر قوة انفجارية يمتلكها الانسان او انه اسرع نظام قادر ان يوفر الطاقة التي يتطلبها ديمومة عمل الجسور المستعرضة فهذه المنظومات غير معقدة حيث لا تتطلب اكثر من تفاعل واحد فقط وبالتالي فأن عدد الانزيمات المراد تنشيطها هو انزيم واحد فقط وانها منظومات غير هوائية (لا تتطلب تدخل (O2 وان مركبات الطاقة فيها اي المركبات الفوسفاتية ذات الطاقة العالية مخزونة في الليف العضلي اي لا تأتي من مناطق اخرى وكل تفاعلات هذه المنظومات تحدث في الساركوبلازم منطقة التراكيب الانقباضية السركية والرفيعة ولكن هذه السرعة الهائلة في اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين وبالتالي القوة الانفجارية المتولدة لا تأتي دون ثمن والثمن الذي ندفعه هنا هو على حساب الكمية فكمية الثلاثي فوسفات الادينوسين المعاد بناءها محدودة لأن الخزين من هذه المركبات الفوسفاتية محدودة وبما ان كمية الطاقة المستهلكة هي كمية قليلة ولكنها ذات طبيعة انفجارية فأن استعادة نظام الفوسفاجين هذا ولما بعد الجهد ولكامل قدراته لا يتعدى الدقائق التي لا تزيد على اصابع اليد الواحدة علما من ان البعض يذكر من ان ذلك يتم في

**2- منظومة تحلل الكلايكوجين اللاهوائي anaerobic glycolysis**

ان تحلل الكلايكوجين (glycolysis) وهو الاسم التقليدي لتحلل الكلوكوز في حقيقة الأمر عبارة عن سلسلة من تفاعلات كيميائية تبدأ بالكلوكوز (6 كاربون ، C6H12O6) وتنتهي بمركبين من حامض البايروفيك (3 كاربون ، C3H4O3)

حيث يتحول الكلوكوز خلالها الى فركتوز والذي بدوره ينشطر الى مركبين سلسلي الشكل من 3 كاربون اللذان يخضعان للتغير لغاية تكون مركبين من البايروثيت عند التفاعل 10.

تحدث هذه التفاعلات في ساركوبلازم (سايتوبلازم) الليف العضلي وخلالها يتم تحرير طاقة كافية لاعادة بناء 4 مركبات من ثلاثي فوسفات الادينوسين وعلى وجه التحديد عن التفاعل السابع والعاشر وعلى التساوي. ولكن وفي ذات الوقت تستهلك هذه التفاعلات طاقة لتنشيطها تعادل طاقة مركبين من ثلاثي فوسفات الادينوسين وعلى وجه التحديد من التفاعل الاول والثالث وعليه فأن محصلة الطاقة المتولدة في الساركوبلازم ومن هذه المنظومة هو مركبين من ثلاثي فوسفات الادينوسين.

تتحكم بهذه التفاعلات انزيمات كلايكولية واكثر هذه الانزيما تطرقاً في الادبيات فهي انزيم الهيكسوكاينيز (Hexokinase) الانزيم فوسفوفركتوكاينيز (Phospho Fructokinase) (PFK) والانزيم بايروفيت كاينيز (PK) (Pyruvate Kinase) والتي تتحكم بالتفاعلات الاول والثالث والعاشر على التوالي علما من ان اكثر هذه الانزيمات أهمية هو PFK حيث يشار اليه على انه مفتاح المنظومة وان نشاط هذا الانزيم يعتمد على توفر الطاقة في الليف العضلي حيث ينشط هذا الانزيم مع تراكم احادي فوسفات الادينوسين ويقل نشاطه مع تراكم ثلاثي فوسفات الادينوسين وتقليدياً يقاس ذلك بقراءة نسبة توفر الطاقة ATP , AMP فإذا ما انخفضت هذه النسبة (طاقة حركية قليلة) ينشط هذا الانزيم واذا ما ازدادت (طاقة حركية عالية) توقف العمل.

النقطة الجوهرية التي يجب ان نشير اليها هنا والتي تتعلق بتسمية هذه المنظومة هوائية او لا هوائية تكمن في انه خلال تحلل الكلوكوز الى مركبين من البايروفيت تفقد سلسلة التفاعلات هذه عدد من آيونات الهيدروجين ولو أعدنا النظر في تركيب الكلوكوز لوجدناه يلة التفاعلات هذه عدد من آيونات الهيدروجين ولو أعدنا النظر في تركيب الكلوكوز لوجدناه يتكون من 6 كاربون و 12 هيدروجين و 6 اوكسجين (C6H12O6) ولو اعدنا النظر كذلك في تركيب البايروفيت لوجدناه يتكون من 3 كاربون و 4 هيدروجين و 3 اوكسجين وبما ان التكون هو مركبين من البايروفيت فما علينا الا مضاعفة ذلك ليصبح المجموع 6 كاربون و 8 هيدروجين و 6 اوكسجين ومن الواضح هناك فرق في الهيدروجين والحقيقة يتحرر الهيدروجين من هذه المنظومة وعلى وجه التحديد عن التفاعل السادس وبمعدل 4 ايونات هيدروجين.

ان تحرر الهيدروجين هذا لا يكون حراً ولوكان كذلك لكان تراكم آيونات الهيدروجين وظهور الحموضة فهو سببه التفاعل السادس ولكن تتحد آيونات الهيدروجين هذه مع مركب ناقل لهذه الايونات يدعى بالنيكوتينوآميد آدنين داي نيوكليوتايد Nicotinoarnide Adenine Dinucleotide NAD" , " (علماً من ان بناء هذا المركب يعتمد على توفر أحد الفيتامينات في الغذاء وهو في الغذاء وهو فيتامين الناياسين "Niacin" حيث يصل هذا المركب \*\*\* اختزالية ساركوبلازية "اختزال \*\*\* العام اكتساب الشيء" لايونات الهيدروجين المتحررة من هذه المنظومة وان ديمومة عمل هذه المنظومة يعتمد على هذه القوة الاختزالية وان المعادلة لهذا التفاعل هي:

ان استمرار تحرر الهيدروجين اي استمرار \*\*\* الكلايكوجين يؤدي الى تراكم المركب NAD المختزل أي NADH وبالتالي انخفاض المركب NAD المؤكسد اي انخفاض القوة الاختزالية الساركوبلازمية لايونات الهيدروجين وهذا يبطئ من تحلل الكلايكوجين وعليه يجب المحافظة على هذه القوة الاختزالية لايونات الهيدروجين لديمومة عمل المنظومة وهناك احتمالين لذلك:

1. نقل ايونات الهيدروجين المتحررة من هذه المنظومة اي من الوسط الساركوبلازمي هذا "الى بيوت الطاقة" "Mitochondria" لغرض اكسدة ايونات الهيدروجين هذه بفعل الاوكسجين وتكون الماء "H2O" حيث يقوم المركب النيتاميني NADH بنقل الهيدروجين الى منظومة مكوكية مبنية تركيبيا في جدار بيت الطاقة يدعى بالمكوك البروتيني حيث تعمل هذه المنظومة على نقل آيونات الهيدروجين من ال NADH الموجود في الوسط الساركوبلازمي الى مركب فيتاميني آخر يدعى فليفن آدينين داي نيوكليوتايد "FAD , Flavin Adenine Dinucleotide " (علماً من ان بناء هذا المركب يعتمد على توفر احد الفيتامينات في الغذاء وهو فيتامين الرايبوفليتن "B2 , Riboflavin" المختزل وليتكون المركب FADH أي المؤكسد والذي بدوره ينقل آيونات الهيدروجين هذه الى منظومة السلسلة التنفسية وهي المحطة الاخيرة لايونات الهيدروجين وتكون الماء وبعمل المكوك البروتيني هذا يصبح المركب NADH حراً مرة اخرى من الهيدروجين ويعود كقوة اختزالية ساركوبلازمية NAD المختزل ويعود الى منظومة كال الكلايكوجيني ولنقل آيونات هيدروجين جديدة ان النقطة الجوهرية هنا والتي يجب ان يشار اليها هي ان عمل المكوك البروتيني هذا يعتمد على توفر الاوكسجين في السلسلة التنفسية حيث ان غياب الاوكسجين او انخفاض مستواه يؤدي الى قصور في عمل المكوك البروتيني وبالتالي تراكم ال NADH وضعف القوة الاختزالية الساركوبلازمية لايونات الهيدروجين وبالتالي ضعف المنظومة الكلايكوجينية في اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين ولكن بتوفر الاوكسجين وانتقال ايونات الهيدروجين من الوسط الساركوبلازمي الى بيوت الطاقة يجعل تحلل الكلايكوجين تقليدياً يدعى بتحلل الكلايكوجين الهوائي.
2. بغياب الاوكسجين في بيوت الطاقة بتراكم ال NADH وبالتالي ضعف القوة الاختزالية الساركوبلازمية لايونات الهيدروجين وضعف الطاقة المتولدة من تحلل الكلايكوجين ويترجم ذلك بتباطؤ في الطاقة المتولدة وبالتالي التباطؤ في اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين ولكن هناك سبيل ثاني وآخر للمركبات الفيتامينية NADH بأن تهب آيونات الهيدروجين المنقولة الى البايروفيت المركب الاخير من تحلل الكلايكوجين ويتكون اللاكتيت والذي يعرف تقليدياً بين اوساطنا بحامض اللبنيك "C3 H5 O3"

هذا التفاعل يحافظ على القوة الاختزالية الساركوبلازمية "المختزلة بـ NAD" لايونات الهيدروجين المتحررة من المنظومة الكلايكوجينية انفة الذكر علماً من ان الانزيم المتحكم بهذا التفاعل هو الانزيم لاكتيت دي هايدروجينز "LDH Lactate DeHydrogenase" اومع هذا الاختمال يسمى تحلل الكلايكوجين حينها بتحلل الكلايكوجين اللاهوائي "يطلق عليه بعض الاحيان بنظام حامض اللبنيك".

ان الفرق في هاذين الاحتمالين هو سرعة اعادة بناء ثلالثي فوسفات الادينوسين فتكون حامض اللبنيك واعادة تكون القوة الاختزالية الساركوبلازمية للهيدروجين "NAD" يجعل المنظومة الكلايكوليه تعمل بسرعة عالية وبالتالي اعادة بناء سريعة لثلاثي فوسفات الادينوسين ولكن ما \*\*\* به هنا سر كمية ثلاثي فوسفات الادينوسين المعاد بناؤها بجزيئة الكلوكوز اذا ما تحللت لا هوائياً الى تكون مركبين من حامض اللبنيك فانه محصلة اللطاقة الكلية المعاد بناؤها لكل جزيئة كلوكوز هي مركبين من ثلاثي فوسفات الادينوسين في حين ممكن ان تصل تلك الطاقة الى 36 مركب من ثلاثي فوسفات الادينوسين واكثر اذا تحللت جزيئة الكلوكوز هوائياً وسوف نتطرق الى هذا الفرق وسببه في النظام الهوائي.

أما لما بتعلق بمميزات هذه المنظومة اللاهوائية فتتلخص في ان هذه المنظومة ذات طبيعة انفجارية ولكن معدل اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين لا يرتقي الى الطبيعة الانفجارية الفوسفاجينية فعلى الرغم من كون ان تفاعلات المنظومة هي ساركوبلازمية المكان ولا تتوقف على الاوكسجين وان مادة الطاقة مخزونة في العضلة "يخزن الليف الحبيبات الاكلايكوجينية" الا انها تتطلب منظومة اعقد من التفاعلات وجدناها 10 تفاعلات وهناك انزيم لكل تفاعل وكذلك هناك اشارات الى علاقة للكرياتين المتحلل نتيجة للمنظومة الفوسفاجينية بتنشيطه لهذه المنظومة. اما كمية الطاقة المتوفرة ورغم ان لكل جزيئة كلوكوز هناك محصلة 2 مركب من ثلاثي فوسفات الادينوسين الا انها اكثر بكثير من الطاقة المتوفرة من المنظومة الفوسفاجينية التي وجدناها 1 : 1 وافداً ولما يتعلق بمحدوديتها فإنه خلاف محدودية المنظومة الفوسفاجينية والمتعلق بتخزين المركبات الفوسفاجينية كانت محدودية هذه المنظومة الكلايكولية اللاهوائية هو تراكم حامض اللبنيك وزيادة الحموضة في الجسم حيث ان ذلك يؤدي الى اعاقة الفعاليات الحيوية وبالتالي التباطؤ في اعادة بناء ثلاثي فوسفات الادينوسين وظهور ما يسمى بالتعب.

**3- المنظومة الهوائية Aerobic System**

قد يتبادر الى ذهن البعض الى ان المنظومة او النظام اللاهوائي معقد ولكن حقيقة الامر ان ما تقدم لا يرتقي في صعوبته وتعقيده الى ما يحدث في المنظومة الهوائية وليسهل علينا فهم هذه المنظومة سنجزئها الى 3 مراحل :

**1- تكون المركب اسيتل كو أي (Acetyl CoA)**

قبل أن نتوسع في هذه المنظومة علينا ان ندرك هنا ان مصادر المركب آسيتيت (CH3- COO) والذي يكون متحداً مع المركب الناقل شبيه الانزيم (Co A) هو الكاربوهيدرات والدهنيات والبروتينات ولكننا سوف لن نتطرق الى البروتينات لانها ليست المصدر الاساس وعليه سيقتصر تطرقنا الى الكاربوهيدرات والدهنيات.

**ب- تكون المركب اسيتل كو أي من الحوامض الدهنية**

تدعى المنظومة التي يتكون معها اسيتل كو أي من الحوامض الدهنية بدورة أكسد بيتا (B . Oxidation) وسبب هذه التسمية سنتطرق له لاحقاً ولكن علينا الان ان نتكلم بعض الشيء عن الدهون.

تخزن الدهون على شكل مركبات ثلاثية تدعى بالتراي اسيل كليسيرول (Tri Acyl Glycerol) حيث يتكون هذا المركب من الكليسيرول وثلاث حوامض دهنية (وهي حرة في الطبيعة) والتي ممكن ان تكون من نوع واحد ، نوعان ، أو 3 أنواع من الحوامض الدهنية لهذا المركب الثلاثي ومن هذه الحوامض والذي سيكون موضوع دراستنا هو حامض البالميك (Palmic Acid) (16 كاربون)