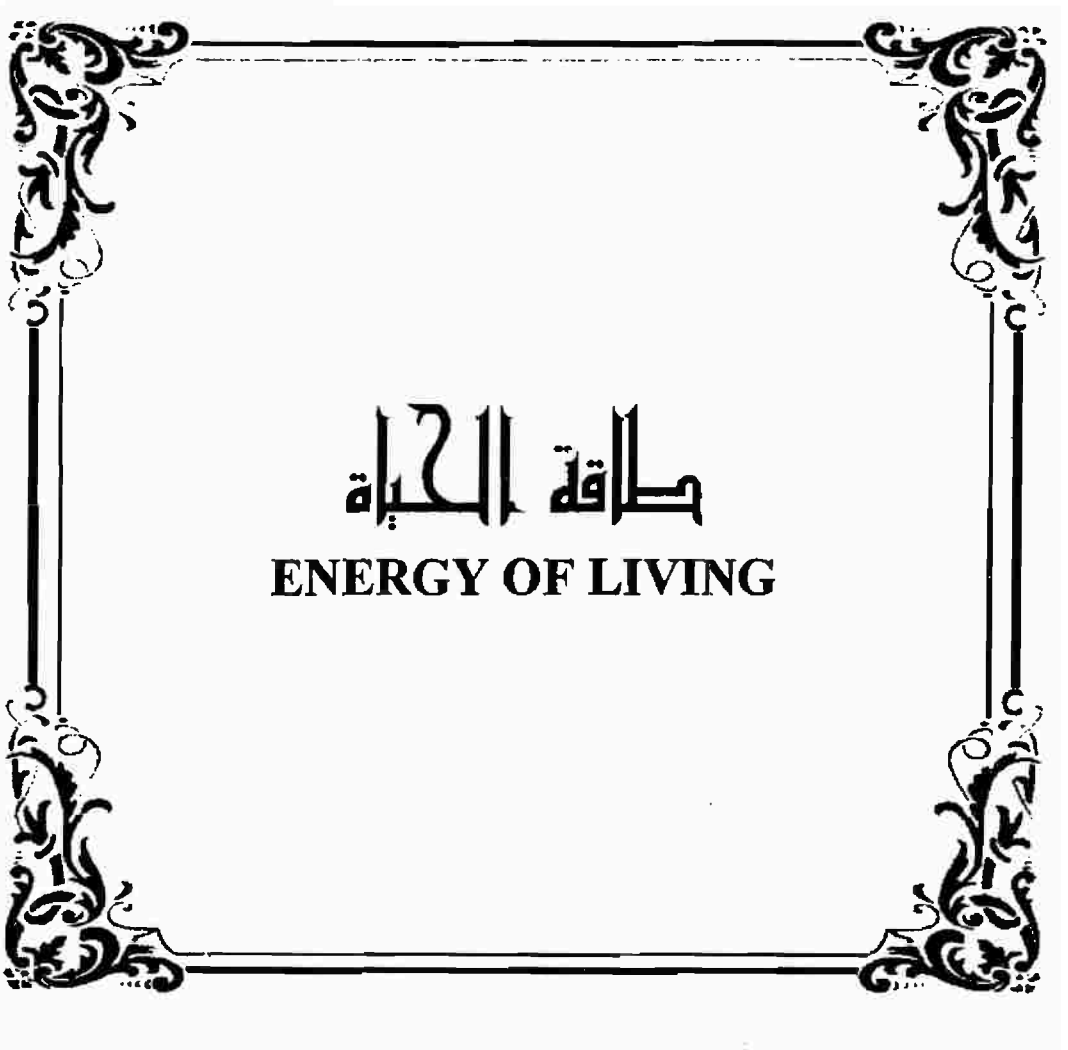

طاقة الحياة
ENERGY OF LIVING

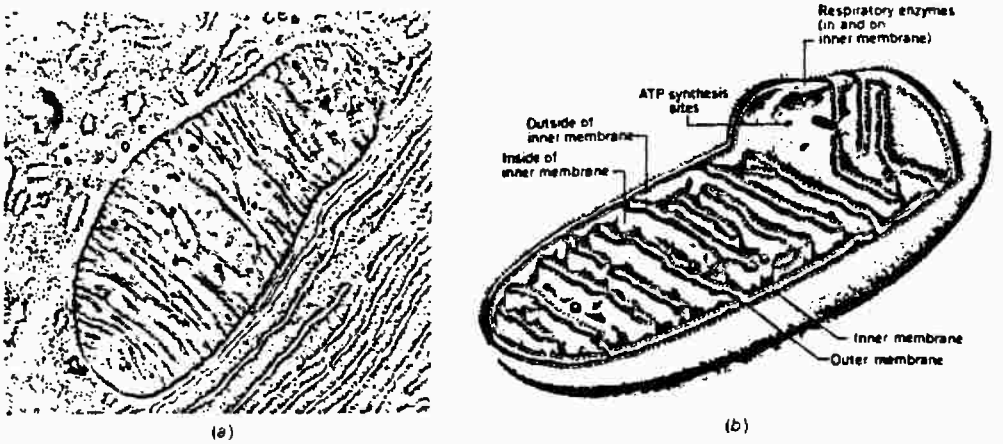
طاقة الحياة Energy of Living

الفوسفاتات عالية الطاقة مثل الأدينوسين ثلاثى الفوسفات (ATP) هى وسائل الجسم للحصول على الطاقة المحررة بأكسدة نواتج الهضم. إننا غالباً نتكلم عن حرق الطعام ، إن خلايانا لا يمكنها أن تستخدم الحرارة مباشرة لتقوم بوظائفها وبدلاً من ذلك فإنها تستخدم جزء من الطاقة الكيميائية الموجودة فى الطعام لتكوين أعضاء من عائلة الفوسفات التى يمكنها أن تقود العمل بالخلايا حيث يتكون الأدينوسين ثلاثى الفوسفات (ATP) كفوسفات عضوى عالى الطاقة موجود على نطاق واسع فى الكائنات الحية . إنه يوجد بطريقة مباشرة أو بطريقة غير مباشرة فى معظم تفاعلات التمثيل الغذائى المستهلكة للطاقة ، إن ATP يمكن أن يتفاعل كيميائياً مع العضلات والانزيمات والمواد الأخرى فيجعلها تتغير بطرق تسمح لنا أن نعيش ونسير الى أعمالنا .

المصادر الرئيسية للـ ATP :-

إن الطاقة الكيميائية للـ ATP تستخدم لإتمام بعض وظائف الجسم حيث أن جزيئاته تتكسر عادة الى الأدينوسين ثنائى الفوسفات (ADP) . أيون من حامض الفوسفوريك يرمز له بالرمز P_i ، ما الذى يحدث غالباً حتى يقوم الجسم بأخذ الطاقة الكيميائية من جزيئات الطعام المهضوم ودمج ADP & P_i ليرجعا معاً مرة أخرى. هناك إعادة التخليق بمعدل ثابت لفوسفاتات عالية الطاقة لكى تكون فيما بعد هى المصادر الرئيسية كطاقات بيوكيميائية . إن مسارات التمثيل الغذائى الرئيسية يتم فيها إعادة صنع ATP كما ان نواتج الهضم لأى من الثلاث أنواع غذاء الرئيسية تكون مصادر ايجابية للطاقة ولإعادة تخليق ATP . إنها تسلك مسارات الهدم والأيض "التمثيل الغذائى" لكى تحرر الطاقة الكيميائية. إن مسارات هدمها فى الحقيقة تؤدى الى تكوين مشتق من حامض الخليك يسمى اسيتيل مساعد الإنزيم A. إننا سنتطرق الى كيف أن الجلوكوز يتحلل الى اسيتيل مساعد الإنزيم A وكيف ان الأحماض الدهنية من الليبيدات يمكنها أن تقطع و تجزء الى كربونى وحدة الأسيتيل فى اسيتيل مساعد الانزيم A .

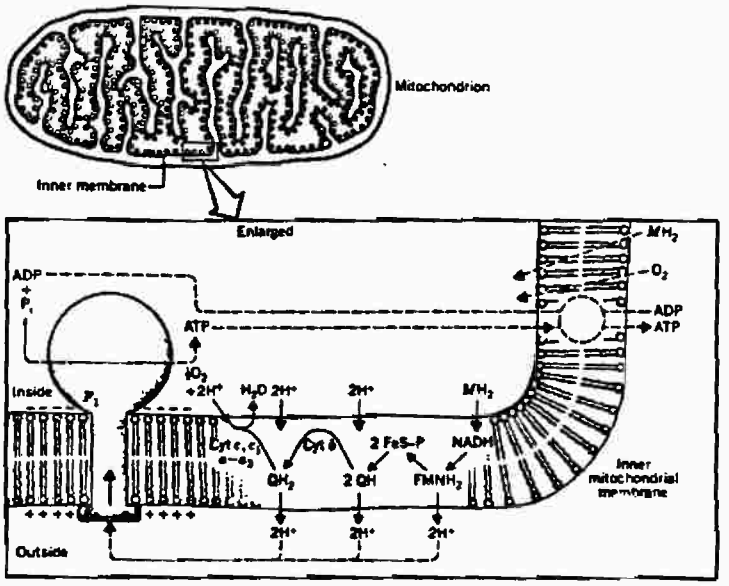
بعض الأحماض الأمينية أيضاً يمكنها أن تتهدم الى اسيتيل مساعد الإنزيم A . إن اسيتيل مساعد الإنزيم A هو وقود المسار الرئيسى فى الهدم والذى يسمى دورة حامض الستريك ، إن الجزيئ الناقل "الحامل" فى الدورة يلتقط مجموعة الأسيتيل ليكون حامض الستريك (علاوة على أيون السترات) والذى يتحلل تلقائياً الى ثانى أكسيد الكربون وماء وكلما



الغشاء الداخلي وعلى القرب منه مواضع تخليق ATP.

A mitochondrion الميتوكوندريون

تخليق ATP يحدث داخل الغشاء الداخلي.



جزء من الغشاء الميتوكوندريالى الداخلى يوضح سلسلة تنفس واحدة ومتراكب $F_0 - F_1$ واحد كما هو واضح على اليمين. يمكن أن يتحرك ADP إلى الداخل فقط إذا تحرك ATP إلى الخارج.

تولد جزىء الناقل أى كلما مرت السلسلة بدورة فإن جزيئات الهيدروجين يتم استخلاصها من المركبات الوسيطة لهذا المسار. إن أيونات الهيدريد $H:^-$ لا تزال تمر مباشرة بمركبات كيميائية فى مسار رئيسى آخر يسمى سلسلة التنفس.

هذه السلسلة تضبط فى الخلية عندما تبدأ مستويات ADP & P_i فى الارتفاع ، يجب التذكر أن أى من النواتج العضوية للهضم يمكن أن تخدم كمواد خام بدائية يمكنها أخيراً أن تعطى أيونات الهيدريد لتجعل سلسلة التنفس تستمر.

سلسلة التنفس :

إن تدفق الالكترونات فى سلسلة التنفس يولد انحدار لأيونات الهيدروجين داخل الميتوكوندريون mitochondrion مما يؤدى الى تكوين ATP من ADP & P_i . إن سلسلة التنفس هى تتابع من تفاعلات تحفز بواسطة انزيمات التنفس. فى جزء مكمل من الغشاء الداخلى من جسم صغير جداً داخل الخلية يسمى الميتوكوندريون mitochondrion . إن كل خلية يمكن أن تملك عدة آلاف من الميتوكوندريا .

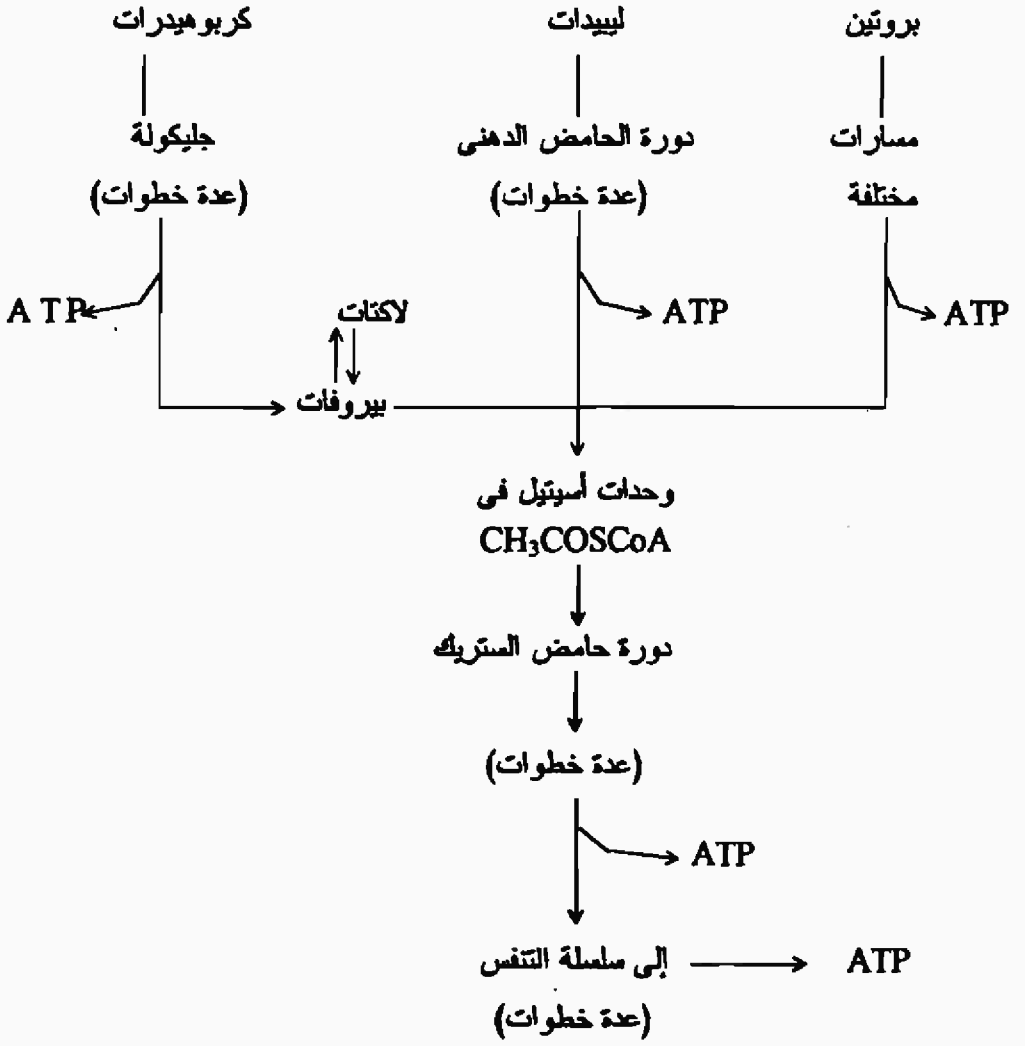
انزيمات التنفس :

المركبات الوسيطة التى تستطيع أن تعطى أيونات $H:^-$ الى سلسلة التنفس تولد فى الداخل فى الفراغ المحاط بواسطة غشاء الميتوكوندريا الداخلى. إن وحدات $H:^-$ تمر مباشرة من هذه الوسائط إما الى NAD^+ أو الى FAD. هناك اثنين من مساعدات الانزيم هى أجزاء من الانزيمات الخاصة ، عند مرور الكترونات $H:^-$ المشار اليها بالنقط فى الرمز $H:^-$ عند نهاية التدفق عند آخر انزيم بالسلسلة فإن هذه الالكترونات تسلم الى دورة الاكسجين وهكذا فإن أحد المراحل الهامة فى سلسلة التنفس هو اختزال الاكسجين. عندما تحدث عملية الاختزال فإن اثنين من أيونات الهيدروجين H^+ تسحب من السوائل المحيطة فيكون جزئ الماء فعلياً هو الناتج النهائى لهذه الفاعلية فى سلسلة التنفس . فى الحالة المجردة يمكن أن يكتب اختزال الاكسجين كما يلى :

$$: \quad + \quad \cdot\ddot{O}\cdot \quad + \quad 2H^+ \longrightarrow H:\ddot{O}:H$$

زوج إلكترونات من $H:^-$ ذرة أكسجين ٢ بروتون الماء

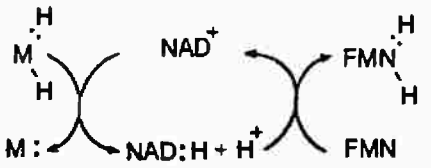
وهكذا فإن أحد المراحل الرئيسية التى تحدث فى سلسلة التنفس هى تدفق الالكترونات من بعض المواد المحولة "الممثلة غذائياً" والتى يمكن أن تعطى $H:^-$ إلى الاكسجين. هذا التدفق من الالكترونات يمكن أن يولد ATP.



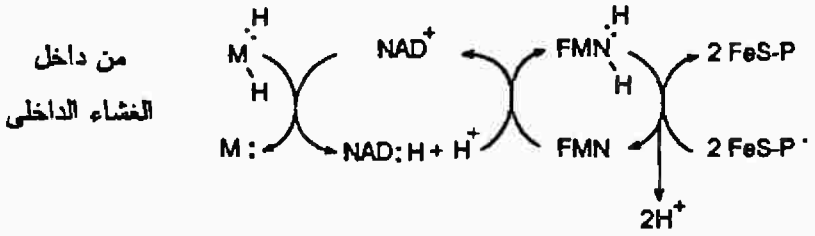
دعنا نمثل المادة التى يحدث لها تحول "تمثيل غذائى" وتعطى $H:^-$ الى السلسلة بالرمز MH_2 بينما M تمثل المادة الممثلة غذائياً. غالباً تكون إحدى مجموعاتها الوظيفية هى كحول ثانوى 2° حيث تتأكسد الى مجموعة كيتو. إذن عندما تنتقل $H:^-$ الى NAD^+ يمكن أن يكتب التالى:

$$M(H)(H) + NAD^+ \longrightarrow NAD{:}H + H^+ + M:$$

إن العامل التالى مباشرة لإنزيم NAD^+ هو انزيم مع FMN كمساعد انزيـــم ، حيـث يستقبل $H:^-$ من NAD:H (مع البروتون مـن السـوائل المحيطـة) ومـن ثـم يمـر زوج الالكترونات على انزيم تنفس آخر. يقف مباشرة بجانب انزيم FMN بروتين كبريت-حديـد الذى يمثل بالرمز FeS-P بينما S هى ذرة الكبريت الموجودة بالسلسلة الجانبية بالسيستين من بروتين P ووظيفتها هى قبول الالكترونات التى تدخل FMN-enzyme. إنـها لا تسـتقبل $H:^-$ من $FMNH_2$ ولكن مجرد الالكترونين (:).



عندما يتم استقبال زوج الالكترونات فإن نواتى الهيدروجين (أيونات الهيدروجين) تطـرد من غشاء الميتوكوندريا الداخلى الى الفـراغ خـارج الغشـاء والمحـاط بواسـطة غشـاء الميتوكوندريا الخارجى. إن هذا التغير هام.



خارج الغشاء الداخلى

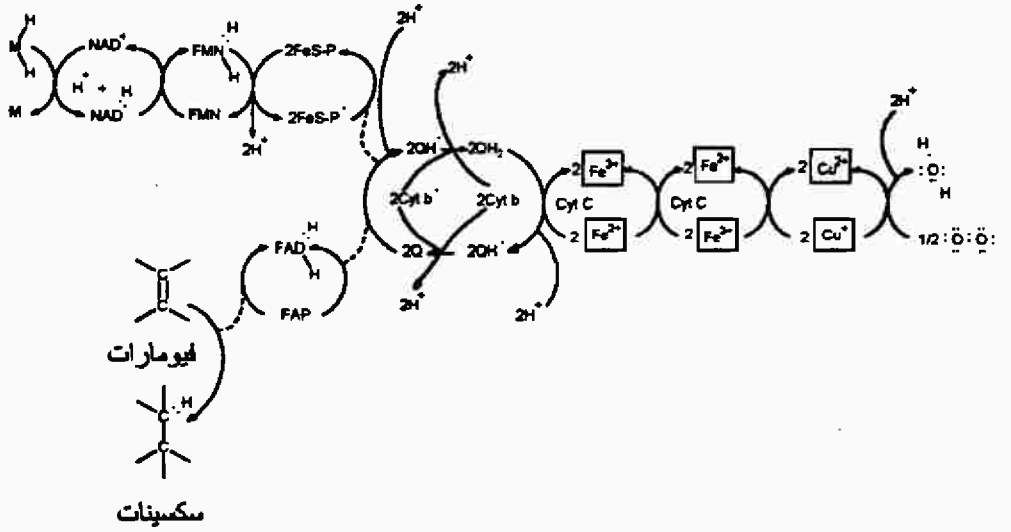
ومن ثم فإن كل جزئ من FeS-P يأخذ فقط الكترون ويمكن أن يكتب 2FeS-P ليتعامل مع زوج الالكترونات. إن سلسلة التنفس معقدة ومن هذا المنطلق فإن انتقال أكثر للألكترونـات من خلال سلسلة تشمل العديد من الانزيمات تسمى السـيتوكرومات Cytochromes والتـى تتميز بأنها تعمل كسيتوكرومات b & c_1 & c & a & a_3 . إن الاثنيـن الأخـيرين أحيانـاً تتجمع تسميتهما فى أسم سيتوكروم أوكسيداز وهذا يحفز اختزال الاكسجين والذى تم وصفـه سابقاً.

سلسلة التنفس وانتاج ATP:

إن حقائق سلسلة التنفس تحدث داخل تجمع الانزيمات الذى يكون فى جزئ مكمل للغشاء الداخلى للميتوكوندريون ، عندما تتدفق الالكترونات يكون أيضاً هناك تدفق للبروتونات من احدى الجهات بالغشاء الداخلى الى الجهة الأخرى حيث يدفع زوج بروتونات الى الفراغ خارج الغشاء الداخلى والمحاط بغشاء الميتوكوندريون نفسه وذلك يتم غالباً عبر باب دوار (لفاف) بالغشاء الداخلى ، ومن ثم فإن وحدات H^+ تدخل هذا الغشاء من احدى الجهات العميقة وتتركها الى الجهة الأخرى الأقرب الى الغشاء الخارجى. هناك اربع بروتونات اكثر تقوم بهذة الرحلة القصيرة حيث ان ستة بروتونات تتحرك عبر الغشاء الداخلى مقابل زوج من الالكترونات يمر تحت السلسلة. ان العملية الكلية للسلسلة يمكن ان تختصر كالآتى :

$$MH_2 + 6H^+ + 1/2\,O_2 \xrightarrow{\text{سلسلة التنفس}} M + H_2O + 6H^+$$

من داخل الغشاء الداخلى — خارج الغشاء الداخلى



سلسلة التنفس

إن نقطتى الدخول هى $FAD\ \&\ NAD^+$

Q = مساعد الانزيم Q

cyt = سيتوكروم

الخطوط المنقطة = تمثل الكترونات

وهكذا فإنه بجانب اكسدة المادة المحولة الممثلة غذائياً والاكسجين المختزل فإن سلسلة التنفس تعمل على خلق عدم توازن في تركيزات ايونات الهيدروجين فتخلق انحدار للبروتونات. اذا كان الغشاء الداخلي منقوب ومحلل فإن انحدار البروتونات لا يستمر. إن سلسلة التنفس يمكن أن تستمر عندما يتم تدمير الغشاء الداخلي ولكن في هذه الحالة لا يصنع ATP . أما عندما يكون الغشاء كاملاً فإنه يسمح لأيونات H^+ بالنفاذ لترجع فقط داخل أماكن محددة عند مواضع بها انزيمات تعرف بالرمز F حيث تقوم بصنع ATP من ADP & P_i . إن الانزيم F ينشط لصنع ATP حيث تتدفق أيونات H^+ من خلاله ، وهكذا فإن الطاقة الكيميائية التي تولدها سلسلة التنفس في خلق انحدار لبروتونات لها طاقة عالية تترجم في تخليق ATP. حيث يحدث عندما تتدفق البروتونات الى الخلف من خلال انزيم يعمل عندئذ على تخليق ATP في غشاء الميتوكوندريا الداخلي أي أن انحدار البروتونات يؤدي الى تخليق جزيئات ATP والتي تتولد بأكسدة مواد التمثيل الغذائي. إن العملية الكلية تسمى عملية الفوسفرة المؤكسدة Oxidative phosphorylation.

عندما يدخل زوج من الالكترونات سلسلة التنفس بفعل NAD^+ فإن ثلاث أزواج من أيونات H^+ تنتقل الى خارج الغشاء الداخلي كما أن كل زوج من أيونات H^+ يولد جزئ من ATP كلما تم تدفقه خلال هذا الغشاء وينشط أيضاً انزيم F_1 . بعبارة أخرى فإن كل زوج الكترونات معطى الى NAD^+ يولد على الأكثر ثلاث جزيئات من ATP وعندما يدخل زوج من الالكترونات السلسلة بواسطة FAD حينئذ يتكون جزيئان من ATP تسمى هذه العملية بالنظرية الكيميائية الأزموتية Chemisomotic theory والعالم الأنجليزي بيتر ميشيل صاحبها حصل على جائزة نوبل عام ١٩٧٨ .

المبادئ العامة للنظرية الكيميائية الأوزموتية :

١- تخليق ATP يحدث مع انزيم موضوع داخل غشاء الميتوكوندريا .

٢- هذا التخليق يتطلب تدفق بروتونات من خلال الغشاء .

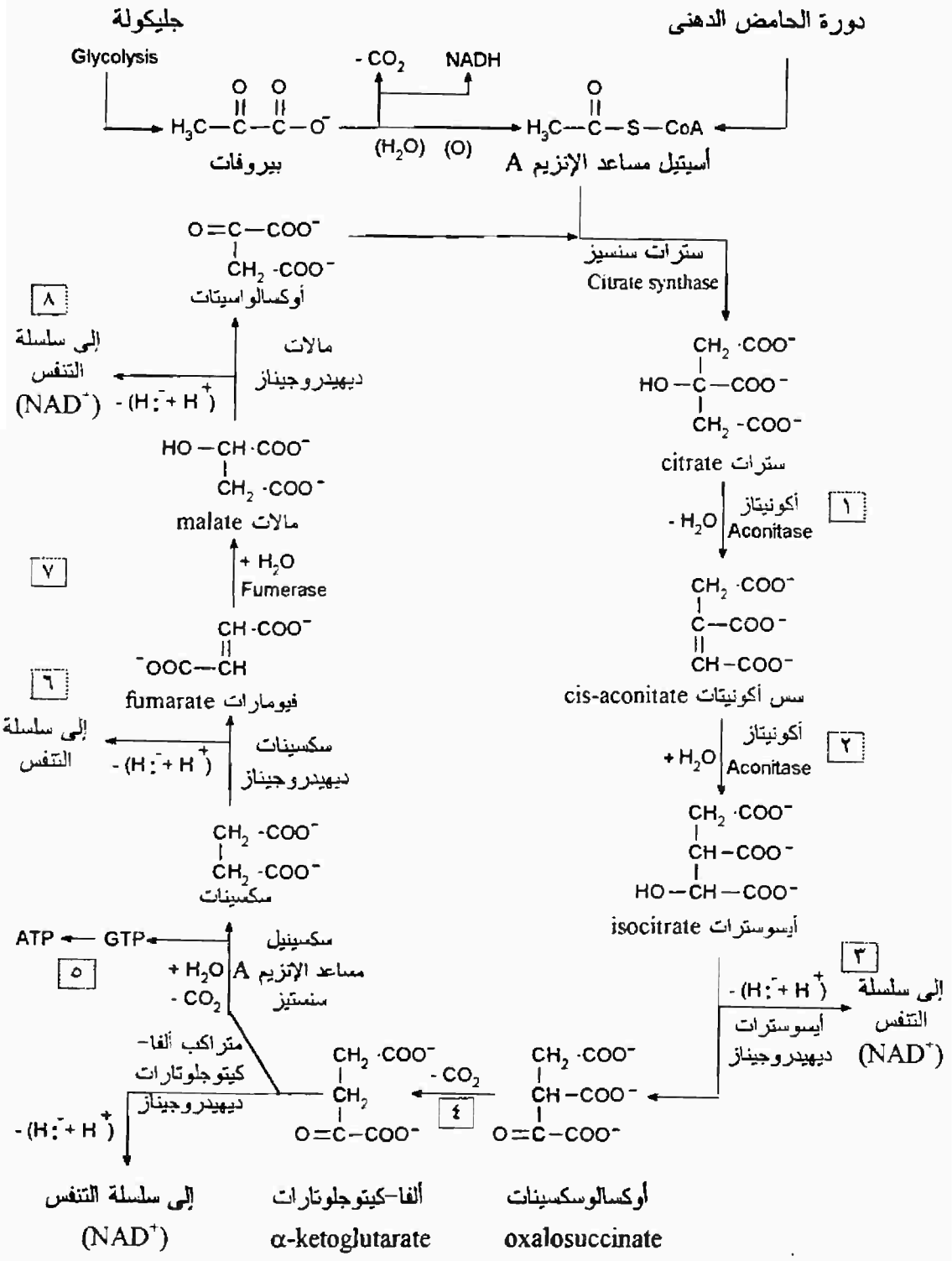
٣- إن الطاقة التي تعمل على تدفق البروتونات يمكن أن تأتي من خلال تدفق الالكترونات في سلسلة التنفس .

٤- إن تدفق الالكترونات يخلق انحدار للبروتونات بين داخل وخارج الغشاء الداخلي .

٥- إن هذا الانحدار يتطلب غلق غلاف الغشاء الدخلي فقط حيث أن انواع معينة يمكن ان تنتقل عند نقاط اختيارية.

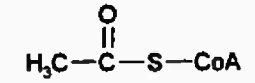
دورة حامض الستريك The citric acid cycle:

إن مجموعات الاسيتيل المحمولة بواسطة أنيونات مختلفة من بعض الأحماض العضوية يمكن أن تتحلل فى دورة حامض الستريك الى CO_2 ووحدات H^+ & $H:^-$ تدخل الى سلسلة التنفس. إن خطوات دورة حامض الستريك تتضح كما فى الرسم والمركبات الوسيطة عند pH الخاصة بفسيولوجية الجسم هى أيونات سالبة لأحماض عضوية . إن ناقل الدورة الذى يلتقط وحدة الاسيتيل هو الاوكسالواسيتات والذى يصبح فيما بعد أيون سترات . إن الأيون السالب من حامض ثلاثى الكربوكسيل يحتوى على ست ذرات كربون .



دورة حامض الستريك

إن وحدات الاسيتيل يمكنها ان تغذى الدورة فقط كمشتقات لمساعد الانزيم A ، إنه مساعد انزيم يحتوى على مجموعة مركبتان "SH" mercaptan . كذلك فإن تركيب مساعد الانزيم A معقد بما فيه الكفاية ولذا يمثل ببساطة بالرمز Co A-SH موضحاً فقط فيه مجموعة SH- . إن مساعد الانزيم A هو ثيوكحول يمكنه أن يكون استر مثل أى كحول . إنه استر اسيتيل .



اسيتيل مساعد الانزيم A

بعد أن تصبح مجموعة الاسيتيل جزء من ايون السترات فإن سلسلة من الخطوات تحدث والتى بواسطتها تتحلل السترات شيئا فشيئا حتى تصل الى اوكسالواسيتات .

تفصيلات عن دورة حامض الستريك:

١- السترات ينزع منها جزئ ماء لتعطى رابطة ثنائية فى سس أكونيتات .

٢- فى سس أكونيتات يضاف جزئ ماء الى الرابطة الثنائية لتعطى ايزوسترات . إن هاتين الخطوتين تحرك مجموعة الهيدروكسيل (OH) إلى ذرة الكربون المجاورة حيث أن ايون الايزوسترات هو ايزومر لأيون السترات .

٣- مجموعة الكحول الثانوية فى الايزوسترات ينزع منها جزئ هيدروجين لتعطى مجموعة الكيتو فى ايون الاوكسالوسكينات (NAD^+ يستقبل $H:^-$). ثلاث جزيئات من ATP يمكن أن تصنع كلما تدفق زوج الكترونات الى سلسلة التنفس .

٤- تفقد الاوكسالوسكسينات جزئ CO_2 لتعطى الفا-كيتو جلوتارات .

٥- إن ألفا-كيتوجلوتارات الآن يسلك خطوات معقدة جداً من التفاعلات حيث أن الماء يوجد هنا كمتفاعل وليس مجرد مذيب . إن السلسلة تحفز بواسطة فريق من الانزيمات تحتوى على مساعد الانزيم A . كما أنه ينفصل مع ثانى اكسيد الكربون والهيدروجين ، إن الهيدروجين يتم استقباله بواسطة NAD^+ مما يؤدى الى تكون ثلاثة جزيئات اكثر من ATP ، إن الناتج هو مشتق مساعد الانزيم A لحامض السكسينك حيث يفقد وحدة مساعد الانزيم A ليتغير الى أيون السكسينات كذلك فإن جوانوسين ثلاثى الفوسفات (GTP) يتم تصنيعه أيضاً. GTP مثل ATP هو فوسفات مرتفع الطاقة ينقل وحدة الفوسفات الى ADP لكى يصنع ATP .

٦- السكسينات تعطى الهيدروجين الى FAD وليس الى NAD^+ وهذا يؤدى الـــى انتـــاج جزيئين من ATP . "يتكون ايون الفيومارات" .

٧- الماء المضاف الى مجموعة الالكين فى الفيومارات يكون المالات malate.

٨- إن مجموعة الكحول الثانوية فى أيون المالات malate تتأكسد الى مجموعة كيتو وهذا يرجعنا الى نقطة البداية حيث أن الجزئ الناقل "الحامل" هو الاوكسالوسيتات .

إن أيون المالات يفقد هيدروجين حيث يذهب الى NAD^+ فى سلسلة التنفس فتصنع ثلاث جزيئات من ATP.

إن دورة واحدة فى دورة حامض الستريك تبدأ مع اسيتيل مساعد الانزيم A فيتولد عنـــها على الأكثر ١٢ جزئ من ATP ولكى يحدث ذلك فإن الخلية يجب ان تحدث شغل حيث تأخذ إمداد من P_i & ADP والخلية يجب ان تحصل أيضاً على امداد مـــن الاكســـجين . أحيانـــاً بعض الأنسجة تكون منهكة وخلاياها لا يمكن لها ان تحصل على الاكسجين بســـرعة كلمـــا احتاجت اليه .