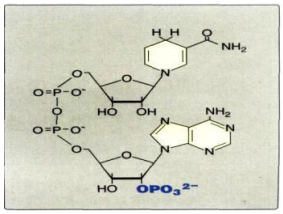
مسار فوسفات البنتوز :

اعتبرت دورة الكلاكوليسز لسنوات عديدة هي الدورة الوحيدة لتمثيل الكلوكوز لحين اكتشاف دورة فوسفات البنتوز والتي تعتبر ذات اهمية كبيرة للكائنات الحية عموما وللعديد من انواع البكتريا خصوصا . وتكون الحصيلة النهائية لعملية اكسدة (6) جزيئات من glucose -6-p هي تحول جزيئة واحدة الى غاز ثاني اوكسيد الكربون وماء مع اعادة ترتيب وتكوين خمس جزيئات من الكلوكوز المفسفرة ثانية . ويسمى مسار فوسفات البنتوز (pentose phosphate pathway) أو (phosphogluconate pathway) أو (hexose monophosphate shunt) أو (HMP pathway) وتعرف بانها العملية الكيمائية التي يتم من خلالها تكوين البنتوزات أو السكريات خماسية الكربون.

ان مسار فوسفات البنتوز ينتج مركبات مهمة جدا وهي : الكوانزيم(الانزيم المساعد) NADPH , وهو بدوره يعمل كناقل للالكترونات, وهذا الكوانزيم متخصص غالبا في عمليات البناء ومن بينها : صناعة الأحماض الدهنية, الكلسترول...اما السكريات خماسية الكربون : فانها تدخل في تكوين النيكليوتيدات.

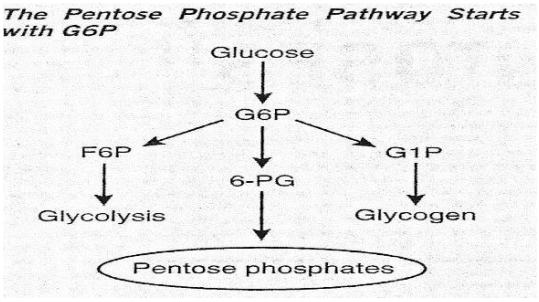
ما أهمية سبيل البنتوز فوسفات ؟
لسبيل البنتوز فوسفات وظائف حيوية هامة و مميزة هي كالتالي:

1 -تشكيل سكاكر خماسية pentose تكون أساس تشكيل الحموض النووية ، حيث من مشتقات هذا السبيل سكر الريبوز 5 فوسفات الذي ي ستخدم في بناء النوكليوتيدات.



كما يمكن بدء اً من نواتج هذا السبيل صنع السكاكر السداسية و السباعية.

2- تشكيل NADPH ، حيث ي عد السبيل الأمثل لتصنيعه.و يختلف ال NADPH عن ال NADH ، فله وظائف عدة مميزة:
أ)يرجع نواقل الطاقة Reduce power carriers في السبل البنائية. Synthetic pathways
ب)له دور كمضاد أكسدة خلوي(Cellular antioxidant لأنه مرجع)و ذلك في السبيل البنائي للحموض الدسمة و الستيرولات ، وهو مفيد جد اً للكريات الحمر فيحميها من التحلل الدموي.
ت)يحمل الطاقة الكيميائية على شكل طاقة مرجعة.
3 - يؤمن هذا السبيل ميكانيكية(آلية)لاستقلاب و استخدام السكاكر خماسية الكربون المتناولة غذائياً أو الناتجة عن عمليات التقويض degradation للسكريات البنيوية في الجسم



وخطوات التفاعل هي :

1- ان هذه الدورة تشتق من دورة الكلاكوليسز بشكل مباشر ويكون فيها عملية اكسدة G-6-P بشكل يؤدي الى تكوين 6-phosphogluconate ويشترك انزيم glucose -6-phosphodehydrogenase , بعد ذلك يتحلل مركب lactone المتكون بفعل انزيم lactonase ليكون مركب 6-phosphogluconate والذي بدوره يؤكسد لاحقا وتزال منه جزيئة CO_2 ليعطي سكر خماسي مفسفر هو Ribulose – 5- phosphate وان ذرة الكربون المزالة هي ذرة رقم (1) .

2- يتكون المركب Ribulose – 5- phosphate وتحت تاثير انزيمات xylulose epimerase و pentose phosphate isomerase يتكون مزيج متوازن مركبات Ribulose – 5- phosphate وRibose-5-p و xylulose-5-p ثم يحدث اعادة ترتيب لذرات الكاربون لهذه السكريات الخماسية المفسفرة تحت تاثير انزيمات transaldolase و transketolase وتتكون مركبات وسطية رباعية وسباعية الكربون C_4 و C_7 بسلسلة من التفاعلات التي لا تحتاج الاوكسجين وجزيئة واحدة من Ribose-5-p و xylulose-5-p تتفاعلان لتكوين سكر سباعي الكربون يسمى sedoheptulose -7-p وسكر ثلاثي الكربون هو glyceraldehyde-3-p والتفاعل يحدث بفعل انزيم transketolase الذي يحتاج الى عامل مساعد هو(TPP) thiamine pyrophosphate .

3-ثم يحدث تفاعل نقل بين المركبين glyceraldehyde-3-p وsedoheptulose -7- p يشترك فيه الانزيم transaldolase ويتكون نتيجة ذلك fructose-6-p والسكر الرباعي المسمى بـerythrose -4-p .

4- انزيم transketolase يشترك بتفاعل بين erythrose -4-p وxylulose-5-p وينتج عن هذا التفاعل مول اخر من fructose-6-p ومول واحد من glyceraldehyde-3-p وجزيئة fructose-6-p بفعل انزيم phosphohexose isomerase تحول الى glucose -6-p ويمكنها بالتالي ان تعود الى الدخول للدورة مرة ثانية , وعليه فان المحصلة النهائية للدورة لغاية هذه المرحلة هي :

$$6\ \text{glucose-6-p} \longrightarrow 4\text{-glucose –p} + 2\ \text{glyceraldehyde -3-p} + 6CO_2$$

5- يقوم الانزيم triose phosphate isomerase بتحويل جزيئة واحدة من glyceraldehyde -3-p الى dihydroxyacetone-p وهذه تتحد مع جزيئة اخرى (glyceraldehyde -3- p) فتكونان fructose -1,6- bisphosphate ثم يحدث لهذه الجزيئة ازالة مجموعة فوسفات واعادة ترتيب ال isomerized فتعطي glucose-6-p وهذا يكون الجزيئة الخامسة من glucose-6-p (الاربعة السابقات ذكرت بالمعادلة) من خلال التفاعلات نجد ان تفاعلين قد ادت الى تكوين NADPH وبذلك فانه (12) جزيئة (لان في كل تفاعل 6) يجب ان يعاد اكسدتها في كل دورة . وفي البكتريا وبالاعتماد على النوع فان اثنين او ثلاثة من ال ATP تنتج من اكسدة ال NADPH وعليه فان كمية الATP هي اما 24 او 36 جزيئة ولكن واحدة قد صرفت خلال عملية فسفرة الكلوكوز الى glucose-6-p وبهذا يكون التفاعل الكلي النهائي في الطاقة هو :

$$\text{Glucose} + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{ATP}(23 \text{ or } 35)$$

هذه التفاعلات توضح كيف ان دورة البنتوز تكون الطاقة من خلال اكسدة الكلوكوز كليا الى CO_2 وماء ومع هذا فان هذه النتيجة لا تعتبر النتيجة الاساسية والوحيدة لهذه الدورة وان الNADPH المتكون يعتبر المصدر الرئيسي للمواد المختزلة التي تحتاجها الخلية بعملية تمثيل الدهون وايضا الدورة تهيئ الهيكل الكربوني للمركبات الوسطية ومركبات اخرى مثل pentose وerythrose وtriose phosphate .

ويجب ملاحظة ان عملية اعادة الترتيب اللاهوائي للهيكل الكربوني للسكريات الخماسية المفسفرة يمكن لخمس جزيئات من السكريات السداسية المفسفرة ان تعطي ستة جزيئات من السكريات الخماسية المفسفرة من خلال التفاعلات لا تأكسدية non – oxidative على عكس عملية اكسدتها المباشرة الى سكر خماسي مفسفر وCO_2 . وهكذا التفاعلات لها اهمية في بعض الخلايا كما في بعض خلايا pseudomonas التي تفتقر الى انزيم 6-phosphogluconatedehydrogenase وبالتالي فليس لها القدرة على تكوين السكر الخماسي المفسفر بفعل عملية الاكسدة وازالة الكربون لل glucose-6-p وبهذه الحالة فان ال fructose -6-p و glyceraldehyde-3-p يمكنها ان تبدان بالتفاعلات اللاهوائية التي تعود الى تكوين السكر الخماسي المفسفر pentose-p.

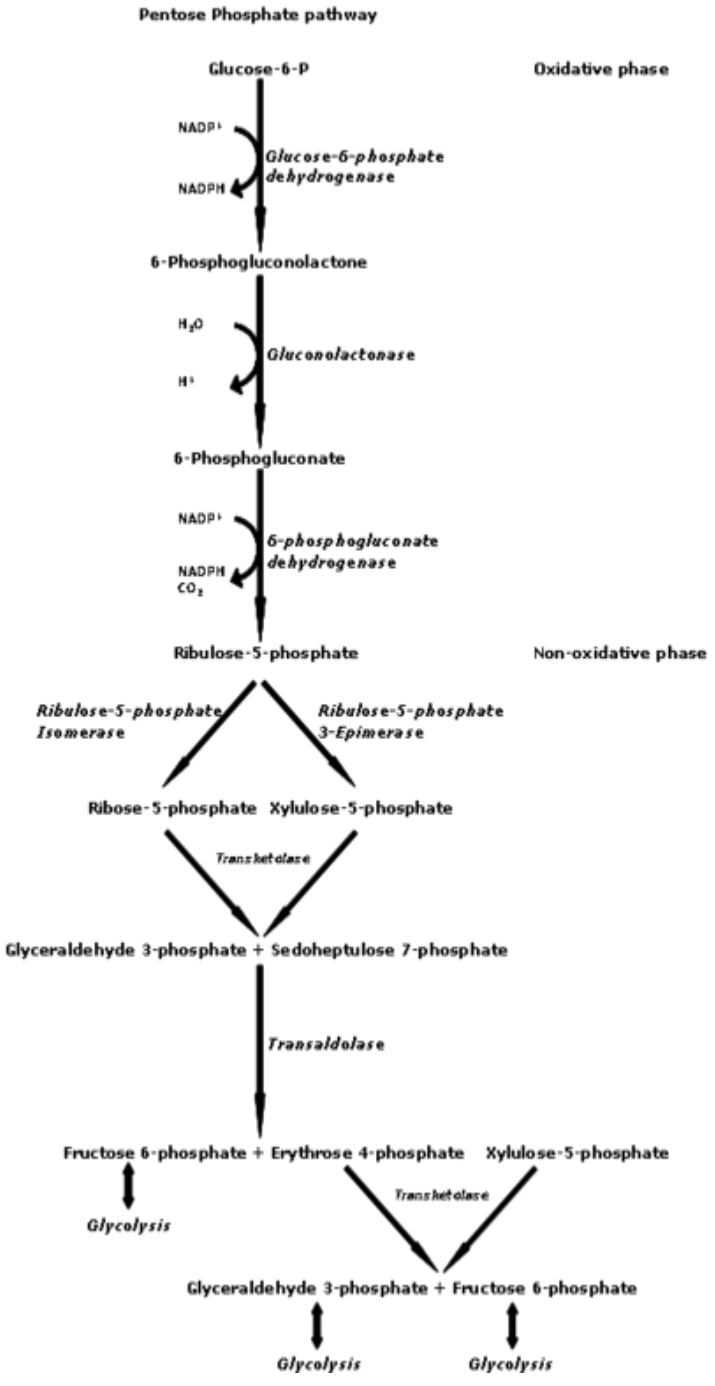
مما سبق يتبين ان هذه العملية انتجت :

12 جزيئة NADPH وحسب نوع البكتريا فانه يمكن ان ينتج 2 او 3 من جزيئات ATP في السلسلة التنفسية لكل NADPH تؤكسد وعليه فان عدد ال ATP الناتجة اما :

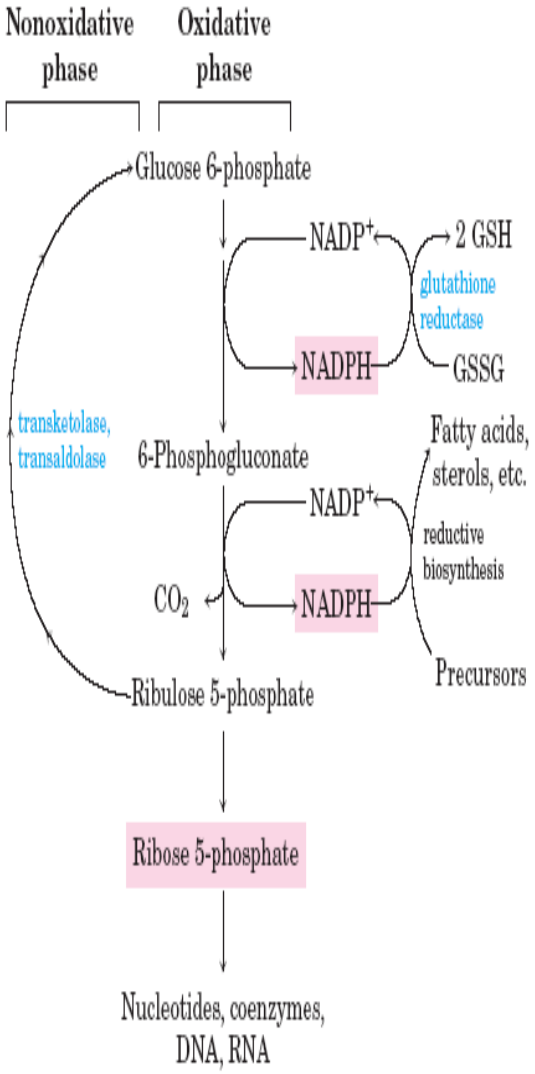
$$24 = 12 \times 2$$

او $$36 = 12 \times 3$$

ولكن تم حرق ATP عند اول خطوة وهي تحول الكلوكوز الى glucose-6-p لذا فان الباقي اما 23 ATP او 35 ATP.



مسار فوسفات البنتوز



السلسلة التنفسية والفسفرة التأكسدية

يطلق على عملية انتقال الألكترونات من الوقود الغذائي الى الأوكسجين الجزيئي في الخلية بعملية "التنفس الخلوي". فمجاميع الأسيتايل كوA المشتقة من الدهون والكاربوهيدرات والأحماض الأمينية تدخل دورة كربس (TCA) ويزال منها ذرات الهيدروجين التي تحول ال NAD^+ الى NADH ويتخلف الCO_2 كناتج نهائي من عملية التنفس الخلوي. تنتقل ذرات الهيدروجين أو مايكافؤها من الألكترونات عبر ما يسمى "بسلسلة ناقلات الألكترونات أوالسلسلة التنفسية" لتصل الى جزيئات الأوكسجين كمستقبل نهائي للألكترونات (أو لذرات الهيدروجين)، وعبر هذا الانتقال ستتحرر كميات كبيرة من الطاقة معضمها بشكل ATP من ارتباط ADP مع Pi بعملية تسمى "بالفسفرة التأكسدية ".

تلعب سلسلة ناقلات الألكترونات دوراً مهماً في اعادة أكسدة NADH أو$FADH_2$ الى NAD^+ أو FAD المحدودتا الكمية في الخلية والمتسهلكتان في عمليات أيضية سابقة.

ان النظم الانزيمية التي تحفز عمليتي السلسلة التنفسية و الفسفرة التأكسدية تقع في الغشاء الداخلي للمايتوكوندريا في الخلايا حقيقية النواة بينما تقع في غشاء البلازما في الخلايا بدائية النواة.

عند أكسدة جزيئة NADH واحدة من خلال السلسلة التنفسية ستؤدي الى تحررثلاثة جزيئات من ATP وعند أكسدة جزيئة $FADH_2$ واحدة من خلال السلسلة التنفسية ستؤدي الى تحرر جزيئتان من ATP.

المراحل الثلاثة للعمليات الهدمية والبنائية