فسلجة الأحياء المجهرية Microbial physiology

يهتم موضوع الفسلجة الماكروبية بدراسة التفاعلات الأيضية التي تقوم بها الأحياء المجهرية بغية النمو والتكاثر، تحتاج هذه التفاعلات الى طاقة وتستمد هذه الأحياء طاقتها الأساسية اما من ماهر مخزون في المركبات الكمياوية المختلفة او من اشعة الشمس. وبالرغم من أن معظم الأحياء المجهرية تستخدم المركبات العضوية مصدرا وحيدا للطاقة ولكن بعضها تعتمد على الطاقة الضوئية وان جميع الأحياء المجهرية بدون استثناء تستطيع أن تخزن الطاقة بشكل يمكنها من أن تصير تفاعلاتها الأيضية أن التفاعلات التي تجري لتصنيع مواد البناء الأساسية (كاربوهدرات، حوامض امينية، وحوامض دهنية وقواعد نتروجينية) هي نفسها وتكون متشابهة في جميع الكائنات الحية فمثلا الية تخليق الحامض الأميني التايروسين في بكتريا القولون الايشيريكا القولونية يفترض أن تكون هي نفسها التي في جسم الانسان وهذا مايحدث فعلا تقسم العمليات الأيض الى قسمين:

١.الأيض الهدمي : Catabolism وهي تفاعلات كيميائية معقدة تقوم بتكسير المركبات المعقدة الى وحدات بسيطة وتنتج عن هذا الأيض تحرير الطاقة.

٢ .الأيض البناني : Anabolism وهي تفاعلات كيميائية معقدة لتخليق مركبات معقدة من وحدات بسيطة وهذه العملية تستهلك الطاقة

الطاقة Energy

الطاقة هي القدرة على انجاز شغل. وتستطيع الانظمة الحيوية أن تستغل الطاقة الكمياوية او الضوئية او كلاهما معا لاداء الشغل في تصنيع المواد الخلوية بحيث تنتج خلايا جديدة. ويمثل ضوء الشمس مصدر الطاقة الرئيس للكائنات الحية وتتحول هذه الطاقة الضوئية الى طاقة كميائية من خلال عملية التخليق الضوئي (photosynthesis) والاحياء التي تستغل الطاقة الضوئية تتضمن النباتات الخضراء والبكتريا الزرقاء (Cyanobacteria) والبكتريا الخضراء والأرجوانية وهذه كلها تدعى بالاحياء الضوئية التغذية(phototrophs) ، أن الطاقة الكمياوية المتولدة اثناء عملية التخليق الضوئي تخزن في بعض المركبات العضوية لتشكل مصدرا متجددا للطاقة الكمياوية للكائنات الحية التي لا تستطيع القيام بعملية البناء الضوئي وهذه الأخيرة أما أن تكون كمياوية لا عضوية التغذية (chemolithotrophs) التي تستغل الطاقة الكمياوية في الجزيئات اللاعضوية او تكون كمياوية عضوية التغذية (chemoorganotrophs) التي تستغل الطاقة الكمياوية في الجزينات العضوية لكي تنمو وتتكاثر. أن كمية الطاقة المتحررة اثناء التفاعلات الكمياوية تدعى بتغيير الطاقة الحرة(Free energy change) ويرمز لها بالرمز و وتمثل (٤٦) كمية الطاقة المتوافرة لاداء شغل معين. وعندما تتفاعل المواد الكمياوية او تتغير من شكل الى اخر فالطاقة اما تحرر الى الخارج او تحبس ضمن مركبات مختلفة ضمن المواد المتفاعلة. والتفاعلات التي تحرر الطاقة تدعى بالتفاعلات المحررة للطاقة (Exergonic Reaction) ويكون فيها التغيير في الطاقة الحرة سالبا (AG –) اما التفاعلات التي تحتاج طاقة فتسمى التفاعلات الممتصة للطاقة (Endergonic Reaction) ويكون فيها التغير في الطاقة الحرة إيجابيا (AG+) وخير مثال على التفاعلات المحررة للطاقة هو اكسدة سكر العنب الي ثاني اوكسيد الكربون والماء

$$C_6H_{12}O_6+6O_2 \longrightarrow 6CO_2+6H_2O \qquad \Delta G= -686 \text{ Kcal / mol}$$

اما التفاعلات الكمياوية التي تحتاج الى طاقة فتتمثل بمعظم التفاعلات التخليقية التي تجري داخل الكائنات الحية مثل عمليات تخليق البروتين ويمكن الحصول على الطاقة لهذه التفاعلات اما مباشرة من خلال هدم بعض المركبات الأيضية او بصورة غير مباشرة من بعض المركبات الكمياوية الخازنة للطاقة. بالاضافة الى ما تقدم يمكن للطاقة أن تتوافر من خلال انتقال

الالكترونات (e)من بعض المركبات الى مركبات اخرى فالمواد التي تفقد الاليكترونات مواد مختزلة (Reductant) والمواد التي تقبل الالكترونات مواد مؤكسدة (oxidant) ويدعى هذا النوع من التفاعلات بالتفاعلات التأكسدية الاختزاليةRedox) (Reactionsوتتحرر الطاقة عندما تنتقل الالكترونات من مادة وهي في حالة الاختزال الى مادة متأكسدة. تستطيع الخلايا ان تحول الطاقة المتحررة اثناء التفاعلات الكمياوية إلى مركبات اخرى تعمل كخازن للطاقة وتحتوي هذه المخازن على جزينات ناقلة لهذه الطاقة وهي موجودة في جميع الخلايا وتتمثل بثالث فوسفات الادينوسين ATP (Adenosin Triphosphate) وتحتوي جزيئة ال (ATP) على القاعدة النيتروجينية الادنين وسكر الرايبوز وثلاث جزينات من الفوسفات وهي تتولد من ثنائي فوسفات الأدينوسينADP (Adenosin Diphosphate) وجزيئة فوسفات لاعضوية بتفاعل ممتص للطاقة.

$ADP+H_3PO_4 \longrightarrow ATP+H_20$ **ΔG =+ ٧,٣ كيلو سعرة / جزيئة**

هنالك جزينة صغيرة اخرى في الخلية تنقل الطاقة الا وهي ثاني نيوكليوتيد الادنين والنيكوتيناميد (NAD) Nicotinamid Adenine Dinucleotide وتتركب جزينة ال NAD بشكل يمكنها من أن توجد في حالة اختزال NAD red وفي حالة تأكسد NAD ox وتحول NAD on الى NAD red عندما تكتسب الكترونين وبروتونا واحدا.

$$(NAD)+(2e-)+(2H+) \longrightarrow (NADH)+(H+)$$

مؤكسد مختزل

وال NAD من المواد الأيضية التي تستطيع نقل الطاقة على شكل الكترونات. وتشترك هذه الجزيئة في العديد من التفاعلات الأكسدة والاختزال) والطاقة المحبوسة في جزيئتي ال ATP وال NADH تصبح متوافرة لجميع التفاعلات التخليقية التي تتوسطها الإنزيمات حيث أن الأنزيمات تلعب دورا مهما في الخلية وان كميتها ونوعها الموجود في الخلية يحددان القابلية الأيضية لهذه الخلية.

التنفس الهوائي Aerobic Respiration

يحصل الانسان والعديد من الأحياء المجهرية على الطاقة وهو في ظروف هوانية اي بوجود الأوكسجين ومن خلال التنفس الهوائي تتحول الطاقة الكمياوية من مركب الى اخر باستخدام الأوكسجين كعامل مؤكسد نهائي. فالكلكوز مثلا يتأكسد عن طريق التنفس الهوائي الى ثاني اوكسيد الكاربون وماء وقد اختزل العامل المؤكسد O٢ الى H٢O في حين ان ذرات الكاربون لجزيئة الكلكوز قد تأكسدت الى co٢ وان كمية الطاقة الكلية التي تحررت من الأكسدة التامة لجزيئة الكلكوز الى ست جزيئات من ال CO٢ وست جزينات من H٢٠ ١٨٩ كيلو سعرة/الجزينة ويخزن جزء من هذه الطاقة في داخل الخلية ويتحرر جزء منها على شكل حرارة وعلى أية حال فان ايض الكلكوز يجري ضمن سلسلة من الخطوات الأيضية التي تشمل تحلل السكر Glycolysis ودورة كريب او دورة الحوامض الكاربو كسيلية الثلاث Tricarboxylic Acid Cycle وسلسلة نقل الالكترونات Electrons Transport chain

تحلل السكر Glucolysis

يجمع التنفس الهوائي بين تحرير الطاقة من الكلوكوز وخزنها في ال ATP وان عملية تحلل الكلوكوز هي اولى السلاسل التفاعلية في عمليات ايض الكلوكوز حيث ينتج منها جزينتان من حامض البيروفيك Pyruvic acid وجزينتان من ال NADred وجزينتان من ال ATP وان جميع هذه الأحداث تجري في آن واحد داخل السايتوبلازم الخلوي حيث أن كل خلية ستمتلك العديد من جزيئات الكلوكوز والعديد من جزيئات المواد الأيضية وتتفاعل كل مادة مع انزيماتها الخاصة ويمكن اجمال عملية التحلل كما يأتي:

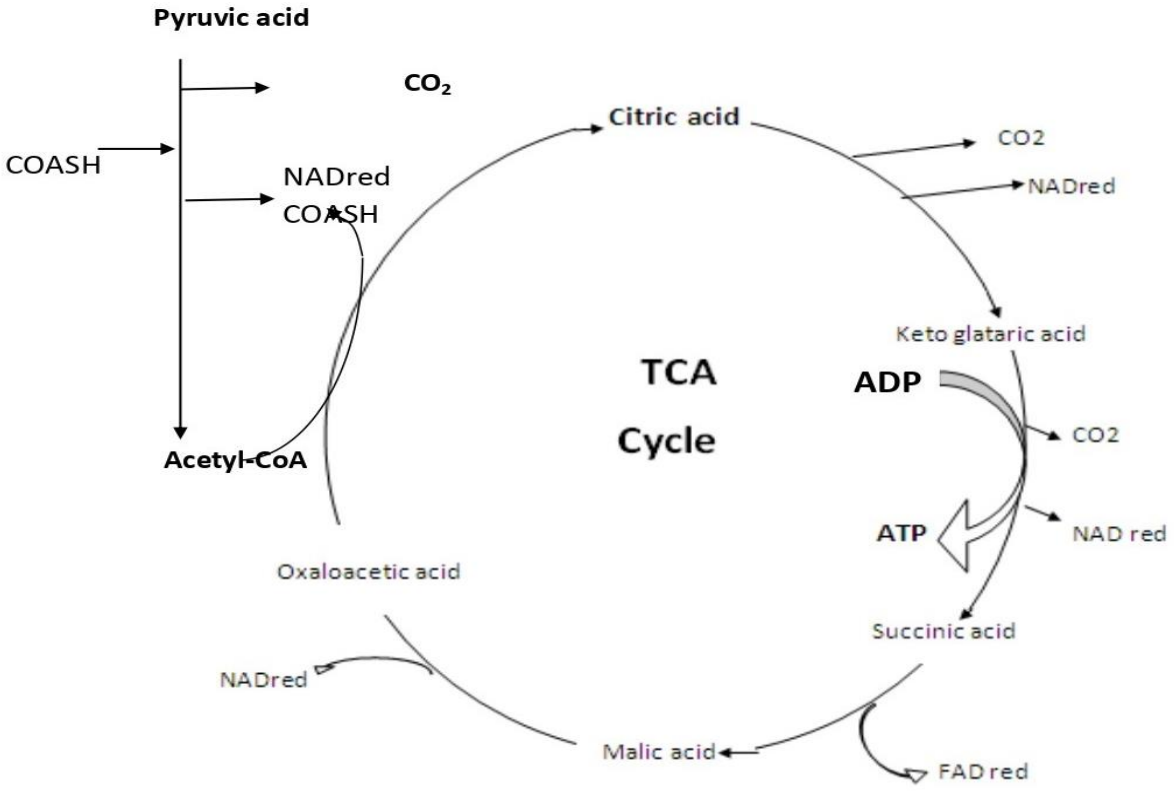
$$(C_6H_{12}O_6+2H_3PO_4+2ADP+2NAD_{OX} \longrightarrow 2CH3\text{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}\text{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}\text{-}OH+2ATP+2NADred+2H_2O+2H)$$

(حامض البايروفيك)

وواضح أن حامض البايروفيك يحتوي على كمية من الطاقة يمكن تحريرها باستمرار عمليات الأيض لذلك فان الأحياء الهوائية تمضي في تمثيل هذا الحامض من سلسلة تفاعلات ايضية اخرى ضمن التنفس الهوائي الا وهي دورة حامض ثلاثي الكاربوكسيليك.

دورة حامض ثلاثي الكاربوكسيليكTCA(Tricarboxylic Acid Cycle

وتسمى احيانا دورة krebs cycle أو دورة حامض الستريك Citric Acid Cycle ان جميع الخلايا القادرة على التنفس الهوائي تحتوي على الانزيمات الضرورية لاجراء دورة حامض الكابوكسيليك (TCA) هي عملية ازاحة مجموعة الكاربوكسيل من حامض البيروفيك وتتم هذه الخطوة بوجود Coenzyme A وينتج منها Acetyl– COA وثاني اوكسيد الكربون و NAD red.



مخطط يوضح دورة حامض ثلاثي الكاربوكسيليك (دورة كريب)

ويتحرر ثاني أوكسيد الكاربون عادة الى الوسط البيئي المحيط بالكائن الحي على شكل غاز اما الAcety CoA I فيتحد مع حامض الأوكسالوخليك Oxaloacetic acid ليكون حامض ثالث الكاربوكسيليك والمتمثل بحامض الستريك Citric acid

ان اعادة تكوين حامض الأوكسالوخليك من حامض الستريك في هذه الدورة وبتدخل سلسلة من التفاعلات الانزيمية تنتج جزيئتين من ثاني أوكسيد الكاربون وجزينة واحدة من الفلافين المختزل Reduced flavin وثلاث جزيئات من NADredوجزينة واحدة من ال ATP لكل جزينة من ال Acetyl CoA تدخل هذه الدورة وبهذا فان ايض جزينتين من حامض البايروفيك تنتج من تحلل الكلوكوز تدخل التفاعل الاجمالي الاتي:

$$2CH_3\text{-}C \text{ — } C\text{-}OH+8NAD_{OX}+2Flavin_{OX}+2ADP+2H_3PO_4 \longrightarrow 6CO_2+2Flavin\ red+8NADred+2ATP$$

سلسلة نقل الالكترونات Electron transport chain

تحتوي الخلايا على كميات محدودة من ال MAD واذا مااختزلت جميع الكمية فلن يبقى NADox وبذلك تختل عملية الأيض. ان السبيل المؤدي الى اكسدة ال NADred المتكون من خلال عمليتي تحلل الكلوكوز ودورة حامض ال TCA هو عن طريق سلسلة نقل الالكترونات. يتأكسد ال NADred والفلافينات بواسطة سلسلة نقل الالكترونات المرتبطة بالاغشية الخلوية. ففي الخلايا حقيقية النواة تقع هذه السلسلة في الأغشية الداخلية للمايتوكوندريا اما في البكتريا الهوائية فان موقع هذه السلسلة ينحصر في الغشاء السايتوبلازمي.

تتكون سلسلة نقل الالكترونات من عدد من الجزيئات الكبيرة مثل مجموعة السايتوكروم cytochromes والفلافوبروتينات Flavoproteins وبروتينات الكبريت والحديد Iron Sulfer proteins وبعض الجزيئات الصغيرة مثل الكوينونات Quinones ويشترك كل واحد من هذه المركبات في تفاعل معين من تفاعلات الأكسدة والاختزال وان المركب الذي يعطي الالكترونات اكثر الى مركبات اخرى هو المركب الأقوى اختزالا والمركب الأقوى اختزالا هو الذي يحتوي على الكمية الأعلى من الطاقة. اذا فالتدرج الكهروكمياوي Electrochemical Gradient يبدأ من المركبات الأقوى اختزالا اي اعلى سالبية في جهدها التاكسدي ضمن سلسلة نقل الالكترونات وتستمر العملية بالتعاقب حتى تصل الأوكسجين وهو المؤكسد القوي الذي يمتلك جهدا تاكسديا موجبا.

الفسفرة التأكسدية Oxidative Phosphorylation

وهي عملية تتكون من خلالها مادة ال ATP مع اعادة تكوين ال NADox عن طريق سلسلة نقل الالكترونات وبأستخدام الأوكسجين عاملا نهائيا ممتصا للالكترونات. ففي وجود الأوكسجين وعند تدخل مجموعة السايتوكروم وفي عملية الاكسدة تحدث ثلاث عمليات فسفرة على الاقل وان انتقال الالكترونات من ال NADred واستقرارها في الأوكسجين بوصفها خطوة نهائية ينتج لدينا ثلاث جزينات من ATP لكل جزيئة من ال NADred وفي الخطوة الأخيرة من سلسلة التفاعل هذه يتأكسد السايتوكروم بواسطة الأوكسجين وينتج عن هذا التفاعل ماء وبروكسيد الهيدروجين H٢٠ وبعض السوبر اوكسيد –٠٢ Superoxide وهذا جذر يتكون عندما يختزل الأوكسجين بواسطة الكترون واحد فقط. ونستطيع أن نلاحظ ان هذه المركبات تنتج من عملية تحلل الكلوكوز ودورة ال TCA وبكميات قليلة وتتحول الكميات القليلة من السوبر اوكسيد الى بيروكسيد الهدروجين بتدخل انزيم Dismutase Superoxide الذي يتحلل بدوره بواسطة انزيم ال Catalase الى الماء والاوكسجين وعلى العموم فأن معظم الخلايا الهوائية تحتوي على الكاتاليز الذي من خلاله تتخلص الخلية من بيروكسيد الهيدروجين العالي السمية

لطاقة المنتجة من التنفس الهوائى

هناك العديد من الخلايا تستخدم تحلل السكر ودورة ال TCA وسلسلة نقل الالكترونات لكي تحصل على الطاقة من خلال اكسدة الكلكوز. وبعملية حسابية بسيطة نجد أن هناك ما مجموعه ٣٨ جزينة من ال ATP يمكن ان تتكون من خلال الأكسدة التامة لجزينة واحدة من الكلكوز اضافة الى ٦ جزينات من ال co٢ و ٦ جزينات من الماء H٢٠ وهذا يعني أن الكائنات الحية تنتج ٢٧٧ كيلو سعرة لكل جزيئة كلوكوز. حيث أن جزينة ال ATP تحرر ٧.٣ كيلو سعرة هذا وتجدر الاشارة الى ان الحرق الكامل للكلوكوز ينتج ٩٨٩ كيلو سعرة جزينة وبهذا فان الكائنات الحية تربح ٤٠٪ فقط من الطاقة الموجودة في الكلوكوز في حالة التنفس الهوائي.

تخزين الطاقة لاهوائيا

تستطيع بعض الكائنات الحية ان تخلق ال ATP من الكاربوهدرات بغياب الأوكسجين فالاحياء التي تعيش في الظلام وفي الظروف اللاهوائية تستطيع أن تنتج ال ATP من الكاربوهدرات اما عن طريق التخمر Fermentation او عن طريق التنفس اللاهوائي (Anaerobic respiration)والبيئات التي توفر هذه الظروف منتشرة بكثرة في الطبيعة مثل الابار العميقة وقاع البحيرات اضافة الى امعاء الانسان.

التنفس اللاهوائي(Anaerobic respiration)

يرتبط التنفس الخلوي على العموم بالغشاء السايتوبلازمي وكما اشرنا سابقا فان الخلية تتوخى من هذه العملية تخزين الطاقة باستخدام سلسلة نقل الالكترونات حيث يمثل الأوكسجين المستلم النهائي لها في حالة التنفس الهوائي اما في حالة التنفس فان المستلم النهائي للالكترونات فيتمثل بمركبات لاعضوية غير الأوكسجين. وان سلسلة نقل الالكترونات في هذه الحالة تتشابه مع تلك التي تعمل في التنفس الهوائي ماعدا المؤكسد النهائي. ومن المستلمات الالكترونية في هذا المجال التي تدخل في عمليات التنفس اللاهوائي هي الفترات NO٣ والكبريتات S٠٤ فبكتريا القولون E.coli تستطيع أن تنمو لاهوائيا عندما يتأكسد الكلوكوزوباستخدام النترات مستلما نهائيا للالكترونات. ونتيجة لعملية الاكسدة هذه ينتج لدينا مشتقات النترات No٢وغاز النيتروجين N٢ وان قابلية الكائن الحي على انتاج النتريتات N٠٢ تحت ظروف غير هوائية غالبا ما تستخدم وسيلة تشخيصية في عمليات تصنيف البكتريا.

ومن البكتريا اللاهوائية التي تختزل الكبريتات هي بكتريا Desulfovibrio sulfuricans فهي تتنفس عن طريق اختزال الكبريتات S٠٤ الى ايونات الكبريتيد ؟ على شكل H٢S او الى الكبريت الذري ؟ وان عملية اختزال الكبريتات هذه الى كبريتيد لهيدروجين هي السبب في اسوداد الطين في بعض الأحيان فضلا عن لون البحر الأسود المائل للسواد حيث أن كبريتيد الهيدروجين يتفاعل مع ايون الحديدوز Fe+ ليكون ملح كبريتيد الحديدوز FeS الأسود اللون.

التخمر Fermentation

يقتصر التخمر على نمط معين من الأيض الذي من خلاله يستغل مركبا عضويا من خارج الخلية لتوليد ال ATP عن طريق تفاعلات الفسفرة بمستوى المادة الأساس. وتطرح نواتج التخمر الى الوسط البيني خارج الخلية. اذ ان الكائن الحي لايستطيع استغلالها اكثر لتوليد ال ATP وبهذا نستطيع القول بان التخمر هو عملية انتاج الطاقة لا هوائيا تلعب فيها النواتج الأيضية الوسطية دور المستلم النهائي للالكترونات وعلى هذا الأساس تكون نواتج التخمر لا اكثر تاكسدا ولا اكثر اختزالا من المادة الأساس. ففي التخمر اللاكتيكي المتجانس Homolactic Fermentation الذي يتم خلال الاستغلال اللاهوائي للكلوكوز مصدرا للطاقة من قبل البكتريا المسبحية Streptococcus Pyogenes وبكتريا Str.lactis تتوضح هذه الظاهرة في عملية

تحلل الكلوكوز لتعطي جزيئتين من حامض البيروفيك وجزينتين من ال NADred وجزينتين من ال .ATP الا انه عندما يتسلم حامض البايروفيك الالكترونات من ال NADred ليتحول الى حامض اللاكتيك في تفاعل يتوسطه انزيمLactic acid dehydrogenaseتتحول عملية تحول الكلوكوز الى عملية تخمر.

ان تحلل السكر ينتج حامض البايروفيك وعندما تتم العملية بمعزل عن الأوكسجين فان العملية تتحول الى تخمر حيث يمثل حامض اللاكتيك المنتوج النهائي.

التغذية الذاتيةAutotrophy

تستمد النباتات الخضراء والبكتريا الزرقاء Cyanobacteria طاقتها من اشعة الشمس وهي تستطيع أن تخلق الكاربوهيدرات الضرورية بالاعتماد على هذه الطاقة وبوجود ثاني اوكسيد الكاربون من خلال عملية التخليق الضوئيPhotosynthesis حيث يتحرر الأوكسجين اثناء العملية:

$$CO_2+2H_2O \xrightarrow[\text{SUN LIGHT}]{} (CH_2O)_n+H_2O+O_2$$

ان هذه الأحياء تستطيع ان تفلق جزينة الماء وبذلك تكون عامل مختزل اولي يقوم باختزال ال co٢ الى كاربوهيدرات. وهناك العديد من الأحياء المجهرية ومنها المجاميع البكتيرية تستطيع القيام بعملية التخليق الضوئي ومن هذه المجاميع البكتريا الزرقاء والأرجوانية التابعة لمملكة الأحياء البدائية النواة الا انها تختلف عن النباتات في كونها لاتنتج الأوكسجين اثناء هذه العملية فبكتريا الكبريت الأرجوانية التابعة لعائلة Chromatiaceae تستخدم كبريتيد الهيدروجين H٢S في هذه العملية وعلى النحو التالي:

$$CO_2+2H_2S \xrightarrow[\text{SUN LIGHT}]{} (CH_2O)_n+H_2O+2S$$

ونرى في هذه المعادلة ان عنصر الكبريت يتحرر اثناء عملية التخليق الضوئي هذا. ومن الممكن أن يتأكسد الكبريت الى كبريتات.SO٤

المصادر:-

كتاب علم الاحياء المجهرية البيطرية, الدكتور فاروق خالد حسن والدكتور خليفة احمد خليفة والدكتور حامد حسن طنطاوي والدكتور جاسم محمد العبد الله ١٩٨٢ ,جامعة بغداد
كتاب مبادئ الاحياء المجهرية ,الدكتور غازي موسى الخطيب والدكتور وهاب امين حسن ١٩٩٠ ,جامعة بغداد
كتاب علم الاحياء المجهرية البيطرية,الدكتور جاسب جاسم حداد ١٩٩١ ,جامعة الموصل