المحاضرة الثالثة : التضخم العضلي L'hypertrophie musculaire

تمهيد:

يوجد هناك نوعين من التضخم العضلي

1- تضخم وقتي أو انتقالي Hyper trophie transitoire

تتمثل عملية التضخم هذه في زيادة حجم العضلة عند أداء تمرين فردي ، حيث يحدث رئيسيا دخول السوائل دم أوالماء في الوسط البين خلوي للعضلة هذا السوائل تأتي من الوسط البلازمي ، وهذا ما يطلق عليه بعملية التضخم الانتقالية بحيث تبقى لمدة قصيرة ، هذا السائل يدخل إلى الأوعية الدموية بعد ساعات من التدريب .

2-تضخم مستمر و مزمن Hypertrophie chronique (أحمد فتحي الزيات، 2000، الصفحات 202-203)

و يتمثل هذا التضخم في زيادة حجم العضلة بعد مدة من التدريب المستمر والطويل بحيث يلاحظ تحولات بنيوية في العضلة ، عن طريق زيادة عدد الألياف العضلية أو زيادة حجم هذه الألياف ويفسر ذلك من خلال:

1- **زيادة كثافة الألياف العضلية : Hypertrophie des fibres musculaire**
2- **تضخم النسيج البيني للألياف العضلية Une hypertrophie du tissu conjonctif**
3- **زيادة تضخم الساركوبلازم Une hypertrophie sarcoplasmique**
4- **انقسام الألياف العضلية Hyperplasie des fibres musculaires**
5- **عوامل أخرى**

2-1-زيادة عدد وحجم لليفات العضلية : إن التدريب الرياضي المرتفع الشدة للقوة يمكن أن يرفع بطريقة واضحة مساحة وعرض الألياف العضلية بحيث

يحدث هذا التضخم بزيادة عدد الألياف العضلية وعدد خيوط الاكتين والميوزين و هذا ما يزيد من إمكانية تشكيل المعقد أكتين ميوزين و بالتالي الرفع من قوة التقلص القصوى .

ينتج التضخم العضلي من تدريب القوة و هذا بزيادة تصنيع و تركيب البروتين في العضلة، و عند أداء التمرينات آليات تصنيع البروتين تنخفض و على العكس آليات الهدم ترتفع، تنعكس هذه العملية في فترات الراحة حيث يزداد تصنيع البروتينات ويمكن ملاحظة تضخم الليفات العضلية في من خلال :

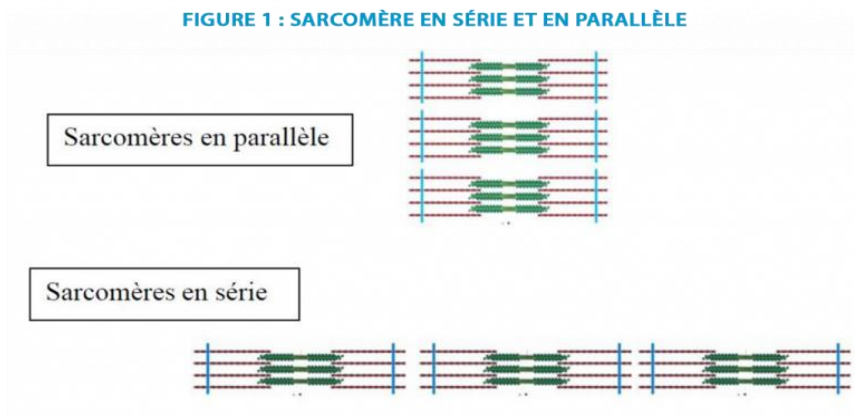
2-1-1-زيادة كثافة الألياف العضلية : Hypertrophie des fibres musculaire

أ- يظهر من خلال زيادة عدد خيوط الاكتين و الميوزين بتصنيع متزايد للبروتينات التقلصية

ب- تتراكم الخيوط الجديدة في محيط الليفات العضلية الموجودة

ج- زيادة عدد الليفات في الليف العضلي و هذا ما يرفع من حجمه.

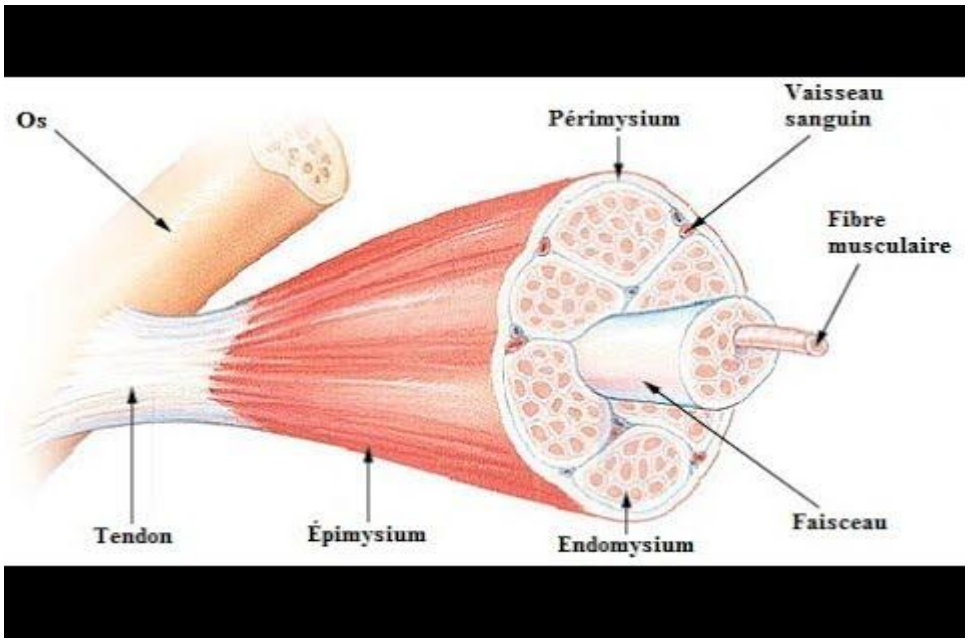
2-1-2-زيادة المساحة المربعة للعضلة : بعد 6إلى 12 أسبوع ، الألياف العضلية تتسع مساحتها وبذلك تتضخم العضلة حيث أن عدد الوحدات التقلصية (sarcomère) في الليفات العضلية يرتفع في شكل سلسلة أو بطريقة متوازية على حسب الوحدة التقلصية الموجودة ، غير أن زيادة عدد الوحدات التقلصية بالتوازي يعتبر العامل الوحيد الذي يرفع من القوة القصوى، حيث أن تركيز الليفات يرتفع مما يطور القدرة على تطبيق قوة أكبر وأكثر، أما بالنسبة لزيادة عدد الوحدات في شكل سلسلة يؤدي إلى تطوير السرعة .



شكل(33)يبين التضخم العضلي على مستوى الوحدة التقلصية بشكل التوازي والسلاسل

2-2- تضخم النسيج البيني للألياف العضلية Une hypertrophie du tissu conjonctif

يغلف النسيج الضام البيني العضلة ككل و الحزم العضلية و الألياف العضلية ضمن ما يسمى بثلاث طبقات على التوالي هي **(endomysiume, périmysium, épimysium)** كما يمثل هذا النسيج حوالي 13 **%** من الوزن الإجمالي للعضلة ، هذه النسبة تعتبر ثابتة لدى رياضيي كمال الأجسام، وهذا يدل على أن زيادة سمك النسيج الضام يؤثر على الحجم العضلي حيث يزداد عرض ومساحة النسيج البيني في العضلة والذي يعتبر نوع من أنواع النسيج الضام (الفجوي أو الخلالي) كما يساهم في الكمال البنيوي والوظيفي للأوتار والأربطة هذه الزيادة تسمح بحماية العضلة، وعند التركيز على تدريب المقاومة نلاحظ التطور االنسيج الضام في شكلين أساسين هما العرض والسمك وذالك في جميع مستويات النسيج الضام **(endomysiume, périmysium, épimysium)**



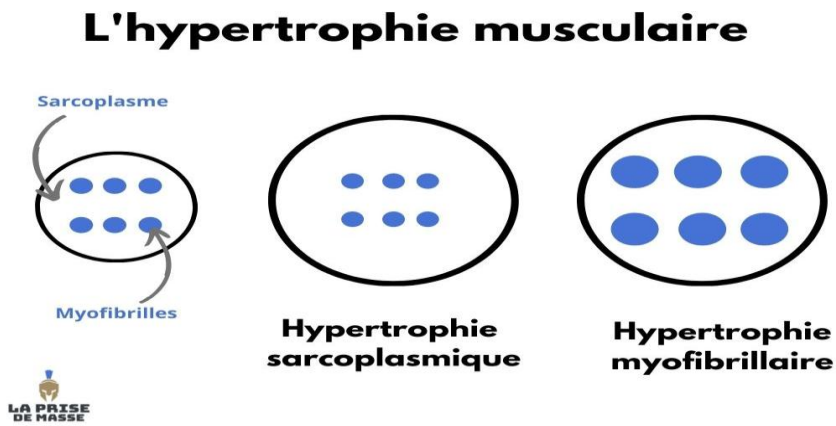
شكل(34)يبين أنواع النسيج الضام على مستوى العضلية

2-3-زيادة تضخم الساركوبلازم Une hypertrophie sarcoplasmique

تحاط الألياف العضلية المخططة بغشاء رقيق مطاطي الذي يحتوي على الساركوبلازم الغنية بالماء بحيث تكون بشكل أحمر نظرا لوجود الميوقلوبين ، الذي يرتفع حجمه مع متطلبات التدريب في وجود الميتوكوندري ، يعمل التدريب الهوائي على تطوير الألياف العضلية الحمراء هذا يعمل على زيادة تركيز الميوقلوبين و تطور حجم الميتوكوندري، يأخذ هذا التطور في الحجم الساركوبلازم و هنا ما يجعلنا نتحدث عن تضخم الساركوبلازم

كما أن التدريب الخاص بكمال الأجسام يؤدي إلى تراكم حمض اللبن. وهذا يؤدي الى انخفاض في درجة PH أي وسط حامضي، و اختلال في القابلية الغشائية مع زيادة السائل البين خلوي مما يسمح بزيادة في حجم الليف العضلي. **(Cayrac C، 2000، صفحة 2)** . التدريب من النوع اللاكتيكي و بشدة متوسطة (الجلكزة اللاهوائية) حوالي 10-12 من التكرارت القصوى يستهلك الكمية المعتبرة من الجليكوجين مع حموضة عالية و انتاج حمض اللبن ، هذه الظاهرة نؤدي الى زيادة قابلية الغشاء الخلوي نتيجة لذلك تهاجر كميات من الماء داخل الخلية ، هذا التدفق يؤدي الى اعادة

تصنيع الجليكوجين مما يحفز زيادة حجم العضلة حيث أن 1 غ من الجليكوجين يحتفظ ب 2.7 من الماء. (Sanches E، 2010، صفحة 7).



شكل(35)يبين الفرق بين التضخم العضلي على مستوى الليف والسركوبلازمة

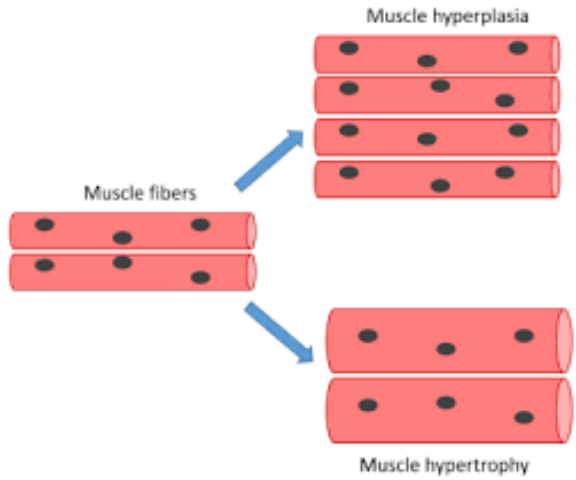
2-4-انقسام الألياف العضلية Hyperplasie des fibres musculaires

انقسام الألياف العضلية يتمثل في حصول شق طولي على مستوى الليف نظرا للتدريب الشاق و المتواصل للقوة العضلية . حيث أشار (Mac Dougall) الى فرضية انقسام الألياف العضلية و هذا راجع الى وجود الخلايا المستشعرة (cellules satellites) التي تلعب دورا كبيرا في نشوء ليف عضلي جديد متوازي مع الليف العضلي الأم. تم تأكيد هذه النظرية على الفئران و القطط . (Cayrac C، 2000، صفحة 4)

دلت بعض الدراسات لدى الحيوانات على حدوث عملية انقسام الالياف العضلية مما يؤدي الى تضخم الحجم العضلي و هذا ما لوحظ في تجربة أجريت على القط بعد مدة من التدريب بشدة عالية حيث يعمل هذا القط على تحريك حمولة ثقيلة هذا ما سمح بتطوير ملاحظ للقوة مع انقسام بعض الألياف العضلية.

و في دراسة أخرى كشفت عملية الانقسام لدى الانسان بعد مدة من التدريب الشاق للقوة و المرتفع الشدة. تم أخذ 12 شخص مع تدريب لمدة 12 أسبوع ، أدى هذا التدريب الى زيادة ملاحظة في عدد الألياف العضلية في اليد (biceps brachial)، هذا يدل على حدوث عملية الانقسام و لكن لبعض الأشخاص فقط و في ظروف

تدريبية خاصة، حيث تعمل الخلايا المستكشفة و المتحركة على المشاركة في توليد و نسخ ألياف عضلية جديدة هذه الخلايا تنشط أثناء حدوث تمزقات عضلية متسلسلة، التي تنشط و تحفز بحيث تتكاثر و تهاجر نحو الأماكن المتضررة ، بعد ذلك إما أن تنقسم مع الليفات العضلية الموجودة أوتتحول الى ليفات عضلية جديدة. (Wilmore J.H, Costil D.L، 2006، صفحة 169)



شكل(36)يبين الفرق بالتضخم العضلي والانقسام العضلي

2-5-عوامل أخرى تساعد في التضخم العضلي:

2-5-1-تأثير الهرمونات :

العوامل المطبقة من أجل تطوير الكتلة العضلية تتمثل في التغذية و النشاط البدني المتمثل في تدريب القوة العضلية . حيث تتدخل مجموعة من الهرمونات من بينها (الأنسولين، التستستيرون، هرمون النمو... الخ) التي من شأنها ان تراقب عملية النمو العضلي. كما توجد هرمونات أخرى التي من شأنها أن تتدخل أيضا في عملية التضخم

العضلي. كما توجد هرمونات أخرى التي من شانها أن تتدخل أيضا في عملية التضخم العضلي (IGF1 ، الميوستاتين ،...) و التي تلعب دورا محليا على مستوى العضلات و التي تراقب أيضا الخلايا المستشعرة التي تتدخل مباشرة في عملية البناء العضلي. **(Ferry Arnaud، 2006، صفحة 107)**

هرمون النمو(GH) و السوماتوميدين (IGF-1) :

يثير هرمون النمو (GH) البناء و النمو في الأنسجة الهيكلية و اللينة حيث يرفع هذا الهرمون عدد الخلايا بتنشيط الانقسام الخلوي و يمنع عملية الموت المبرمج للخلايا كما يزيد من حجم الخلايا بزيادة بناء البروتين، اذ أنه يثير جميع عمليات بناء البروتين و يثبط عمليات تكسير البروتين. و يرفع هرمون النمو من عملية سحب الأحماض الأمينية من قبل الخلايا و بذلك يقلل من مستواها في االدم.

التأثيرات البنائية لهرمون النمو لا تعمل مباشرة على الخلايا بل عن طريق مرافقة وسيط بيبتيدي يدعى (Somatomédine) الذي يتكون من نوعين هما (IGF-I et IGF-II)،النوع المرتبط بزيادة (GH)هو (IGF-I) حيث يحفز هرمون النمو (GH) بناء (IGF-I) الذي يتكفل باستثارة عمليات البناء و النمو في الخلايا و يعتبر الكبد المصدر الرئيسي لبناء وإفراز (IGF-I) في الدم الذي ينتج كثيرا إن لم نقل أنه في معظم أنسجة الجسم **(Sherwood L، 2001، صفحة 98)**

نوعية التأثير الخاص بهرمون النمو على العضلة غير موضح بطريقة جيدة مجموعة من الأبحاث تشير الى أن الدور التضخيمي لهرمون النمو (GH) يؤدي الى زيادة واضحة في هرمون السوماتوميدين (Somatomédine)، المعالجة بهرمون النمو ترفع من التركيز النسيجي ل(ARNm) الرسول المشفر من اجل السوماتوميدين (IGF-1,IGF-2) وفي دراسة تدل على أن تركيز كل من (IGF-1,ICF-2) يرتفع تحت تأثير العمل العضلي، هذه المعطيات تحدد أن التضخم العضلي ينتج من طرف هرمون السوماتوميدين في العضلات الذي ينتج من نشاط هرمون النمو. **(Guezennec C.Y، 1990، الصفحات 281-291)**

من بين عوامل النمو الأخرى و هي هرمونات محلية التي من شأنها أن تتدخل في عملية التضخم العضلي نجد (HGH, FGF,IGF-1,myostaine). توجد دراسات عديدة تطرقت الى دور الوسيط البيبتيدي (IGF-1). حيث توجد مجموعة متعددة من البروتينات الدورية التي تنتج استجابة لهرمون النمو بينما توجد مجموعة أخرى غير

دورية و تنتج محليا من طرف العضلة فقط استجابة لإشارات التجديد او التمرينات العضلية، عند وضع العضلة تحت حمولة ميكانيكية يكون هناك إنتاج معتبر للوسيط البيبتدي (IGF-1) و هذا يعتبر بداية حدوث التضخم العضلي.

قام مخبر مختص بعلم العضلات (la myologie) في جامعة باريس 5 بالبحث عن تحديد دور الوسيط البيبتيدي(IGF-1) على العضلة الهيكلية للانسان. حيث تم نزع خلايا مستشعرة من العضلة والتي أصبحت خلايا جدعية (myoblastes) تنقسم فيما بينها من أجل تشكيل الخلايا المتعددة للنواة (myotubes) أي ألياف عضلية صغيرة في مرحلة التشكل إلا ان هذه العملية أقل دفعا و تطورا في المختبر مقارنة ما يحدث على مستوى الليف العضلي. كما ان الوسيط البيبتيدي (IGF-1) لا يلعب أي دور مهم على عملية تكاثرالخلايا الجدعية الوحيدة النواة ، ومن جهة اخرى يقوم هذا الوسيط بزيادة حجم الخلايا القنوية المتعددة النواة (myotubes) وبالتالي عملية التصنيع البروتيني. **(Ferry Arnaud، 2006، صفحة 110)**

توصلت كذلك دراسات المخبر أن الوسيط البيبتيدي (IGF-1) يطبق تأثير جزئي و المتمثل في تحفيز الخلايا المستشعرة عن طريق عامل الذوبان المحلي وهو الأنترلوكين 13 (IL 13) الذي يحفز الخلايا المستشعرة. تنقسم الخلايا الجدعية (myoblastes) مع الليف العضلي ، و يقوم الوسيط البيبتيدي (IGF-1) بمراقبة التصنيع و كذلك الهدم البروتيني.

كما أن الوسيط البيبتيدي (IGF-1) لا يعتبر العامل الوحيد المسئول عن عملية النمو العضلي حيث يوجد عامل اخر للمراقبة العضلية وهو الميوستاتين (myostatine,GDF-8) وهو يعتبر معدل سلبي للكتلة العضلية. لدى الفئران عند قيام بكبح اوتثبيط الميوستاتين يؤدي ذلك الى حدوث تطور عضلي معتبر ، حيث تصبح الألياف اكثر حجما و عددا و هذا يعطي فكرة في ميدان المنشطات الدوائية أو الوراثية .. **(Ferry Arnaud، 2006، صفحة 111)**

هرمون التستستيرون :

ان تواجد المستقبلات الخاصة بهرمون التستستيرون في العضلات تدل على ان هذا الهرمون يؤثر مباشرة على هجرة المركب هرمون – مستقبل نحو النواة و هذا يؤدي الى زيادة في انتاج ARNm الرسول المسؤول عن تصنيع البروتينات. طبيعة البروتينات الناتجة من حركة الهرمونات الستيروتيدية الأندرونيجية تعتبر غامضة، و

من جهة أخرى دلت دراسة لدى الذكور البالغين على ان تأثير هرمون التستستيرون ينتج عنه نقصان في هدم البروتينات و اكثر خصوصا انخفاض في اكسدة الاحماض الامينية وهذا له تأثير على زيادة تصنيع البروتينات . (**Fahey T.D, Ralph R, Moungemee P, Nagel J, Mort ara S، 1979، الصفحات 31-34)**

كما يعمل هرمون التستستيرون على الرفع من الكتلة العضلية و هذا بالتحفيز الموضعي لتصنيع البروتينات ، التضخم العضلي المستمر تحت التدريب العضلي للمقاومة يفسر التأثير البنائي المتميز للتستستيرون حتى وان لم يكن هناك زيادة في التركيز البلازمي لهذا الهرمون تحت تأثير شدة التدريب. (**Monod H, Flandrios R، 2003، صفحة 175)**

2-5-2--تطور الأوعية الدموية :

عدد الشعيرات الدموية في الليف العضلي يكون مضاعف لدى رياضيي كمال الأجسام مقارنة بالأشخاص العاديين و هذا لا يكون إلا بعد عمل مطول من تدريب القوة بحمولات تتجاوز 50 **% من** أقصى تكرار . زيادة عدد الشعيرات يحفز تدفق دموي موضعي معتبر مما يؤدي إلى توسع الشعيرات الدموية المحيطية. **(Cayrac C، 2000، صفحة 2)**

2-5-3-الخلايا المستشعرة (cellules satellites) :

تتواجد هذه الخلايا المستشعرة ملتصقة مع الألياف العضلية حيث تلعب دورا مهما في تجديد الانسجة العضلية التالفة بعد حدوث التلف او التمزقات العضلية، كما تشارك أيضا في عملية النمو في مرحلة ما بعد الولادة. زيادة الحجم العضلي يمكن ان يكون بطريقتين اولا عن طريق التضخم العضلي (زيادة سمك الليف العضلي) او عن طريق انقسام الالياف العضلية ، عند كلا الحالتين تتدخل الخلايا المستشعرة أثناء حدوث الاضرار العضلية او عند الحصة التدريبية تنتج مجموعة من الرسائل و تستقبل من طرف الخلايا المستشعرة التي من شأنها ان تنشطو تكاثر هذه الخلايا ، بعد ذلك تنقسم مع الليف مما يؤدي الى حدوث التضخم العضلي ، و ظهور شيئا فشيئا أنوية جديدة على مستوى الليف العضلي .تقوم الأنوية بمراقبة تصنيع البروتينات المهمة في تصنيع وحدات تقلصية جديدة بالتوازي(sarcomère) **(Ferry Arnaud، 2006، صفحة 108)** .

لدى العضلة المخططة الهيكلية قدرة على التجديد بعد حدوث تمزقات وهذا بفضل الخلايا المستشعرة (cellules satellites) ، و هي الخلايا الرئيسية الجدعية العضلية الناضجة، القادرة على التجديد الذاتي و المساهمة في اعادة تصنيع الالياف العضلية **(Collins CA, Omsen I, Zammit PS, et a، 2005، صفحة 295)**.

عند حدوث التمزقات ،الخلايا المستشعرة تنشط وتحفز، حيث تصبح الخلايا الرائدة العضلية ، تتكاثر و تهاجر و تنقسم فيما بينها او مع الألياف العضلية ما ينتج عن ذلك استعادة سلامة الأنسجة. التواجد الكبير للخلايا البلعمية (macrophages) يلاحظ خلال كل مراحل التجديد، و هذا يدل على الدور الكبير و الموسع لهذه الخلايا المتمثل في بلع بقايا الانسجة بسبب التمزقات الحاصلة **(Chazaud B, Sonnet C, Lafuste P, et al، 2003، صفحة 795)**.

2-5-4-الخلايا البلعمية (les macrophages) وعملية التجديد العضلي :

في دراسة على مستوى المخبر تم التوصل الى ان العلاقة بين الخلايا الجدعية العضلية و البلعمية ينتج عنها تأثير بيولوجي مختلف، أولا : الخلايا الجدعية تجدب بخاصة الخلايا الدموية البيضاء الغير محببة الدورية (monocytes) وهذا بتدخل 5 طرق للانجذاب الكيميائي و هي (CCL2 , CCL22,CX3CL1 ouFractalkine, VEGF, système de l'urokinase,vascular endothelail growth factor) . ثانيا : التنبيه المشترك يرفع من نشاط الانجذاب الكيميائي لنوعين من الخلايا . ثالثا : الخلايا البلعمية تحفز نمو الخلايا الجدعية بتطبيق الجرعة التابعة، و هذا بإفراز مواد ذاتية جينية، ومن جهة أخرى حدوث اتصال مباشر خلية – خلية من اجل الخلايا الجدعية من الموت. **(Chazaud B, Sonnet C, Lafuste P, et al، 2003، صفحة 36)**

مثل الكريات البيضاء المعتدلة (Neutrophiles) تدخل الخلايا البلعمية الى الأنسجة المتمزقة حيث تنتج مجموعة مختلفة من الليزوزومات التي من الممكن ان تزيد من حدة التمزقات النسيجية. الاستجابة الخطية للخلايا البلعمية القصوى تستمر الى غاية 7 أيام من التمرينات القصوى و تتأخر كلما بقيت المؤشرات البيولوجية للتمزقات العضلية (الالام العضلية و تحرير الانزيمات النسيجية يستمر من يوم الى 3 أيام بعد النشاط البدني). ان هجرة خلايا المونوسيت(monocytes) يمكن ان ينتج عنه انخفاض في عددها على مستوى الجهاز الدوري يوم الى ثلاثة أيام بعد مجموعة من التمرينات.

(Glesson M, Almey J, Brooks S, Cave R, Lewis A, Griffiths H، 1995، صفحة 137)

و في ظروف الالتهاب تعمل الخلايا البلعمية (macrophages) على إفراز هرمون (PGE) الذي يسبب أيضا ظاهرة الآلام المتأخرة (DOMS). وفي الأبحاث الأخيرة تم اختبار أي نوع من الخلايا البلعمية التي تطبق في عملية التجديد العضلي، وما هو ملاحظ ان الخلايا البلعمية كثيرة التقلب و التغير . تواجد عينات تحتية لخلايا المونوسيت الدورية يرفع من درجة تعقيد هذا الجهاز . حيث تستخدم خلايا المونوسيت الرئيسية في الانسجة أثناء حدوث الالتهابات، بينما العينات التحتية من هذه الخلايا ($Gr\text{-}1^{-}\ CX3CR1^{hi}\ CCR2\text{-}CD4^{lo}\ CD16'$) ترتفع فيبعض الحالات المرضية المزمنة. **(Gordon S, Taylor PR، 2005، صفحة 60)**

دائما في المخبر تم التوصل الى ان الخلايا البلعمية الالتهابية . $Gr\text{-}1^{+}\ CX3CR1^{lo}$ المستخدمة تحفز و بقوة تكاثر الخلايا الجدعية العضلية من كبح عملية التمايز لهذه الخلايا، و على العكس الخلايا البلعمية ضد الالتهاب $Gr\text{-}1^{-}\ CX3CR1^{hi}$ تتواجد بعد التغير في الطبع الوراثي و هذا مؤشر قوي للتكون العضلي و انقسام الخلايا الجدعية العضلية.

في الجسم الحي كبح استخدام خلايا المونوسيت في العضلة عن طريق الإنقاص من المونوسيت الدورية و هذا بحقن مادة التوكسين الديفتيري لدى الفئران يوقف كليا عملية التجديد العضلي و هذا يوضح الدوري الرئيسي لهذه الخلايا في عملية إصلاح النسيج . الإنقاص من الخلايا البلعمية البين عضلية أثناء فترة التجديد يخفض من سمك الليف العضلي الجديد، هذا يؤكد تأثير الخلايا البلعمية ضد الالتهاب على عملية التمايز و انقسام الخلايا الجدعية . مجموع هذه الدراسات سمح بوضع نمط لحركة الخلايا البلعمية أثناء عملية التجديد العضلي و إبراز التنوع في العلاقة بين الخلايا البلعمية و الخلايا الجدعية.(**Chazaud B, Sonnet C, Lafuste P, et al، 2003، صفحة 795)**

3-تكيفات الجهاز العضلي عند التدريب الهوائي Les adaptations du système musculaire a l'entrainement aérobie

3-1- نوعية الألياف Le type de fibre:

تستثير النشاطات البدنية الخاصة بالتدريب الهوائي بشدة ضعيفة أو متوسطة الألياف العضلية البطيئة حيث تصبح هذه الألياف أكثر حجما، هذه الزيادة في المساحة تصل إلى 25 % حسب شدة ومدة الحصص المطبقة وفترة التدريب و من جهة أخرى لا تزيد مساحة الألياف العضلية السريعة FT و هذا نظرا لقلة استخدامها في هذا النوع من النشاط. إن الاستمرار في التدريب الهوائي لسنوات يؤدي إلى التحويل وتعديل في خصائص الألياف العضلية FTb نحو العمل الهوائي.

و في دراسات أخرى دلت على تحول الألياف من النوع FTb نحو الألياف FTa ، كما يمكن أن تتحول الألياف السريعة FTإلى الألياف ST لكن هذه التحولات عامة تكون ضعيفة وبنسب قليلة. و يظهر من خلال مشروع (HERITAGE) أن التدريب الهوائي لمدة 20 أسبوع يرفع من نسبة الألياف العضلية ST من 43,2 %قبل التدريب إلى 46,7 % بعد التدريب مع انخفاض في نسبة الألياف من النوع FTb من 20,0 إلى 15,1 % بعد التدريب الهوائي بدون التغير في الألياف العضلية من النوع FTa

3-2-الدورة الشعيرية La circulation capillaire

إن الزيادة في سمك وعدد الشعيرات الدموية في النسيج العضلي يعتبر التحول الرئيسي الحاصل من التدريب الهوائي بحيث يمكن أن تزداد هذه الشعيرات بنسبة 15 % بعد مدة من التدريب الهوائي الطويل والمرتفع الشدة، هذه الزيادة في الشعيرات الدموية تسمح بزيادة مساحة المبادلات الغازية بين الدم والعضلات و كذلك من أجل نقل الحرارة والمواد الغذائية، هذه الزيادة أيضا تسمح بزيادة حجم الأكسجين المستهلك

3-3- محتوى الميوقلوبين La teneur en myoglobine

أثناء دخول الأكسجين في الألياف العضلية يثبت مباشرة في الميوقلوبين الذي يعمل على نقل الأكسجين بين الغشاء الخلوي والميتوكوندري، وأثناء أداء الجهد البدني يخزن الأكسجين في الميوقلوبين ثم يترك نحو الميتوكوندري، يؤدي التدريب الهوائي إلى زيادة محتوى الميوقلوبين في العضلة من 75 إلى 80 %

3-4- وظيفة الميتوكوندري La fonction mitochondriale

إن إنتاج الطاقة في العمل الهوائي يتم على مستوى الميتوكوندري، تتطلب القدرة على توفير الطاقة عن طريق الآلية الهوائية بتوفر عدد وحجم مهم للميتوكوندري، حيث

يعمل التدريب الهوائي على الرفع في هذه الخصائص، وفي دراسة أجريت على الجرذان عدد الميتوكوندري يزداد بـ 15 % بعد 27 أسبوع من التدريب وفي نفس الوقت مساحة الميتوكوندري ترتفع بنسبة 35 %.

3-5-الانزيمات المؤكسدة Les enzymes oxydatives

إن الزيادة في عدد وحجم الميتوكوندري يعمل على الرفع من فعاليتها و هذا ما يحسن من الكفاءة الهوائية في العضلة، يرفع التدريب الهوائي من نشاط الأنزيمات المؤكسدة في الميتوكوندري ، و من بين هذه الأنزيمات نجد (la succinate déshydrogénase SDH, sytrate-synthase)، في دراسة أجريت عند أداء تمرينات الجري أو الدراجة ترفع من نسبة نشاط أنزيم SDH بنسبة 25% على عكس الشخص العادي، هذه النسبة تضرب في 2,6 عند تجاوز مدة التدريب 60 إلى 90.