الدورة الخلوية (2) Cell Cycle

مرحلة الانقسامات (الخيطي Mitosis والمنصف Miosis)

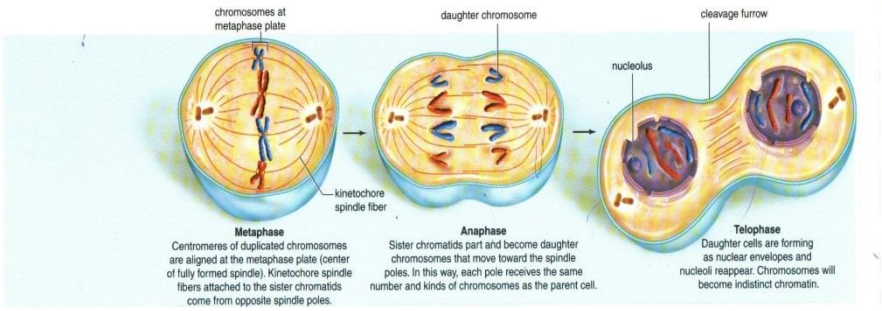
كما ذكرنا سابقا هناك طريقتان مختلفتان للانقسام الخلوي تشتمل عليها الدورة الخلوية هما : الانقسام الخيطي أو الميتوزي (Mitosis)، و الانقسام المنصف أو الميوزي (Miosis)، الذي تم الكشف عن تفاصيله في عام 1900 ميلادي.

ففي نهاية المرحلة البينية و قبيل بدء مرحلة الانقسامات، يضاعف الصبغي مكوناته الكيماوية، و تلعب جزيئة ال DNA دورها الأساسي اذ يتم تضاعف جزيئة ال DNA بفك تشابك السلاسل الجانبية (مجموعات البورين و البيريميدين) و بناء شريطين جديدين فينتج عن ذلك تشكل جزيئة DNA جديدة مماثلة أي أن كل صبيغي يكون عندئذ متضاعف دون أن نتمكن من رؤية ذلك بالمجهر، و يمكن عندئذ تسميتها بالصبغيات.

أولا: الانقسام الخيطي أو الميتوزي (Mitosis):

هو نوع من الانقسام الخلوي، تتمكن الخلية بواسطته من إنتاج خليتين وليدتين متماثلتين تماما، و هو يحدث في جميع الأنسجة الجنينية و يستمر فيما بعد بمعدل أقل في أنسجة الإنسان كلها، ما عدا الخلايا العصبية و العضلية، و هو المسئول عن تكوين الخلايا اللازمة لنمو أنسجة الجسم و المحافظة عليها بتعويض الفاقد من الخلايا. تبدأ عملية الانقسام مع بداية تكثف الصبغيات و تنتهي بزوال تكثفها، و تقسم إلى أربع مراحل هي:

- الطور الطليعي أو التمهيدي Prophase،
- الطور التالي أو طور تكوين المغزل (الطور الاستوائي) Metaphase ،
- الطور الانفصالي أو طور الهجرة Anaphase،
- الطور النهائي أو طور التباعدTelophase(الشكل 78).



176 Phases of mitosis in animal and plant cells
Figure 9.4

Sylvia S. Mader: Biology, 9/e
Copyright © 2007 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

الشكل (78): رسم تخطيطي يوضح الطور التالي أو طور تكوين المغزل (الطور الاستوائي)Metaphase، الطور الانفصالي أو طور الهجرة Anaphase، الطور النهائي أو طور التباعد Telophase من الانقسام الخيطي.

أ- الطور الطليعي أو التمهيدي Prophase:

يبدأ الطور الطليعي عندما تبدأ الصبغيات بالظهور في النواة كخيوط اثر تكثف المادة الصبغية التي تنتج عن انثناء و التفاف الصبغيات، و بالوقت نفسه تصبح الخلية أكثر كروية.

يتألف كل صبغي في هذه المرحلة من خيطين ملتحمين يعرف كل منهما باسم كروماتيد، و ينتج احدهما عن تضاعف الآخر خلال الدور S من المرحلة البينية.

بتقدم الطور الطليعي تصبح الصبغيات أكثر قصرا و ثخنا و البنية الأولية التي تشتمل على المراكز المحركة للصبغيات أكثر وضوحا. و تبتعد الصبغيات كلما تقدم هذا الطور عن مركز النواة لتقترب من الغشاء النووي الذي يبدأ بالزوال و يختفي نهائيا في نهاية الطور الطليعي. و يصبح مركز النواة فارغا تماما من المادة الوراثية.

في هذه المرحلة يتألف كل صبغي من سلسلتين ملتفتين حلزونيا. في نهاية الطور الطليعي تختفي النويات و الغشاء النووي، و تندمج البلاسما النووية مع البلاسما الخلوية. على صعيد التغيرات السيتوبلاسمية فأهم ما يحدث هو بدء تشكل مغزل الانقسام.

ب- طور تكوين المغزل (الطور الاستوائي)Metaphase:

مع بداية هذا الطور، يكون الغشاء النووي قد اختفى بشكل كامل، و تتقلص الصبغيات وتتراص و تتوزع بشكل عشوائي. يتم خلال هذا الدور اكتمال تشكل مغزل الانقسام، حيث تلتحم خيوط المغزل بدءا من القطبين و ترتبط الصبغيات بانيبيبات المغزل بوساطة المراكز المحركة و تتجه بشكل شعاعي لتشكل ما يسمى باللوحة الاستوائية.

إن الانقسام الذي يتشكل فيه مغزل مع مريكزات و أشعة كوكبية يسمى انقسام ذو مغزل شعاعي، و يحدث ذلك في الخلايا الحيوانية و النباتات الدنيا. أما الانقسام الذي لا يشتمل مغزله على مريكزات و أشعة كوكبية فيسمى انقسام ذو مغزل لا شعاعي، و نجده في النباتات الراقية مثل مغلفات البذور و كذلك عريانات البذور. و بالتالي فإن المريكزات و الأشعة عند هذه النباتات تكون غير ضرورية لتشكل مغزل الانقسام.

ج- الطور الانفصالي أو طور الهجرة Anaphase:

في هذا الطور تنقسم الجسيمات المركزية طوليا، و تنفصل كروماتيدات الصبغيات عن بعضها بشكل متزامن، و تبدأ بالهجرة، على طول خيوط المغزل نتيجة انكماش هذه الخيوط، حيث تقصر الى الثلث أو ربع الطول الأصلي الذي كانت عليه في المرحلة السابقة. و ما أن تصل الصبغيات الى قطبي الخلية حتى يصل طور الهجرة الى نهايته، و تصبح الخلية في مطلع الطور النهائي.

د- الطور النهائي أو طور التباعدTelophase:

ترتخي الصبغيات في مطلع هذا الطور، و تصبح غير منطوية على بعضها و أقل تكثفا، و في الوقت نفسه تميل الصبغيات الى تشكيل كتلة محاطة بغشاء نووي متقطع الذي تبدأ عملية اعادة بنائه بوساطة الشبكة البلاسمية الداخلية.في نهاية هذا الطور نجد غشاء نووي متكامل مؤلف من وريقتين و كل غشاء يحيط بالنواة الجديدة.

تبدأ السيتوبلاسما بالانقسام عند المدار الاستوائي للخلية بالتزامن مع ارتخاء الصبغيات و تشكل الأغشية النووية. بعد ذلك يتشكل انخماص يتسارع حتى انفصال الخليتين عن بعضهما البعض. و يتضمن الانقسام السيتوبلاسمي توزع عضيات الخلية مثل الجسيمات الكوندرية و جهاز غولجي و الجسيمات الريبية على الخلايا البنات.

و هكذا تدخل الخليتان البنتان في المرحلة البينية، و تتلقى كل منهما نصف الكمية الصبغية التي سبق أن تضاعفت، أي أن كل خلية تحمل العدد نفسه من الصبيغيات للخلية الأم.

ثانيا: الانقسام المنصف أو الميوزي (Miosis):

يطلق عليه أيضا الانقسام الاختزالي، و يحدث هذا النوع من الانقسام الخلوي حصرا في الخلايا الجنسية المولدة للأعراس داخل الأعضاء الجنسية للكائن الحي (الخصية أو المبيض). و هو نوع من الانقسام الخلوي تتمكن الخلايا التناسلية بواسطته من انتاج الأعراس، و الأعراس هي خلايا أحادية الصيغة الصبغية، حيث تحتوي على نصف عدد الصبغيات. ففي ذكر الانسان و الحيوان يحدث هذا الانقسام في الخصى لتكوين الحيوانات المنوية (النطاف)، أما في الأنثى فيحدث في المبايض حيث تتشكل البويضات الناضجة المعدة للإخصاب.

يتشابه العديد من خطوات الانقسام المنصف مع الخطوات المقابلة لها في الانقسام الخيطي، فالاثنان مسبوقان بتضاعف الصبغيات. و مع ذلك فان هذا التضاعف الوحيد يتبعه انقسامان خلويان متعاقبان، يدعيان الانقسام المنصف الأول و الانقسام المنصف الثاني. ينتج عن هذه الانقسامات أربع خلايا بنات و ليس خليتان بنتان كما في الانقسام الخيطي (تحوي كل منها نصف عدد الصبغيات في الخلية الأم.

ان تطور الخلية البيضية مثلا الى بيضة ناضجة تحتوي نصف كمية المادة الوراثية الموجودة في الخلايا الجسمية، أي خلية أحادية الصيغة الصبغية، يتطلب المرور بسلسلة من التغيرات و التطورات تتعرض خلالها البويضات الى انقسامين منصفين متتاليين هما:

- الانقسام المنصف الأول Miosis-I
- الانقسام المنصف الثاني Miosis-II

لكن هذه الانقسامات لا تحدث بشكل متتابع و تنتهي بسرعة، اذ يمكن للخلية البيضية أن تتوقف في أية مرحلة، و ذلك بحسب نوع الكائن الحي، ثم تعود لتكمل انقساماتها قبل أن تكون جاهزة للإلقاح.

عند الثدييات يحدث قسم من هذه الانقسامات خلال مراحل التشكل الجنيني و قبل الولادة، فمعروف عند الانسان مثلا، أن الخلايا البيضية تتطور في المبيض بدءا من الطبقة الطلائية في قشرة المبيض، ثم تغوص في عمق القشرة جامعة حولها طبقة من الخلايا الجريبية لتشكل البيضة الأولية أو الجريب الأولي.

و تتمايز جميع الخلايا البيضية في مبيض أنثى الانسان خلال الحياة الجنينية و يصل عددها في الأسبوع الثلاثين من الحمل الى أكثر من مليون خلية بيضية أولية.

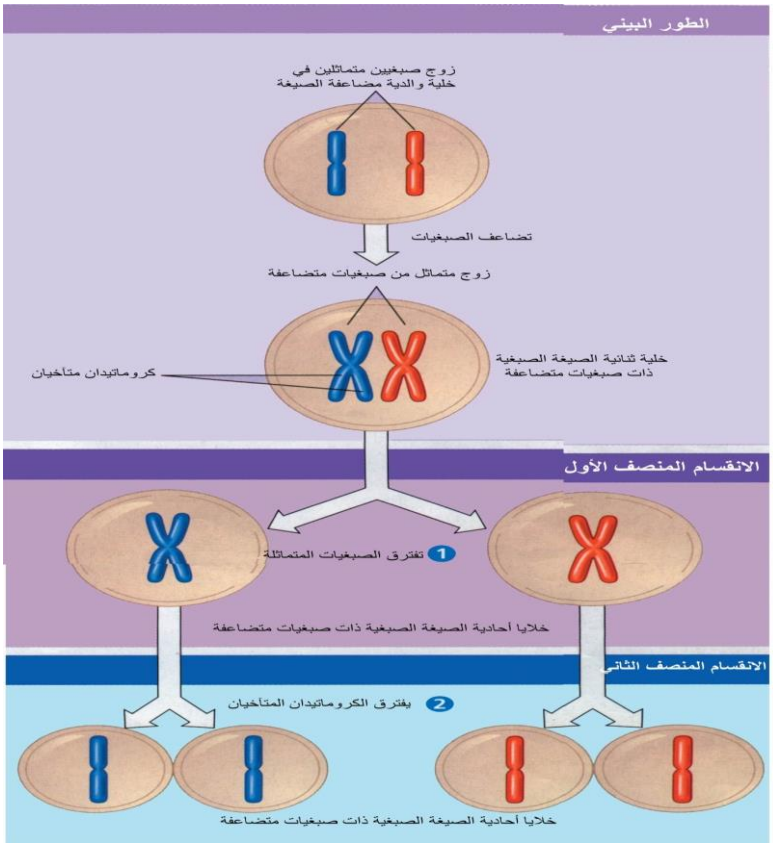
و في هذه المرحلة من التطور الجنيني يبدأ الانقسام المنصف الأول Miosis-I. و قبيل حدوث الانقسام المنصف الأول تكون الخلية البيضية قد ضاعفت مادتها الوراثية (DNA) خلال الطور البيني من الدورة الخلوية. بعد ذلك يبدأ الطور الطليعي من الانقسام المنصف الأول الذي يدوم طويلا، اذ يستغرق أكثر من 90% من الزمن اللازم لمجمل الانقسام المنصف.

أ- مراحل الانقسام المنصف

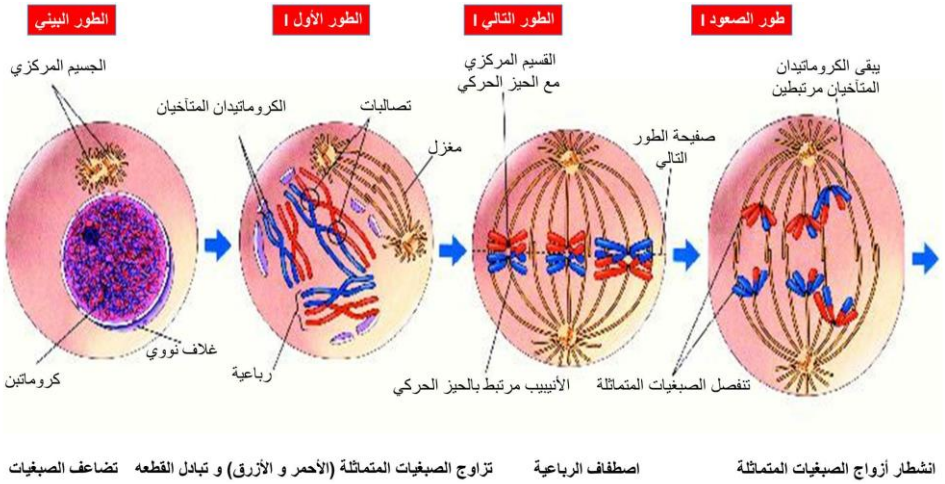
تظهر نظرة شاملة للانقسام المنصف في الشكل (79)كيف يتضاعف كلا الصبغيين في زوج متماثل وحيد من الصبغيات لدى خلية مضاعفة الصيغة الصبغية، و كيف يتم فرز هذه النسخ الى أربع خلايا بنات أحادية الصيغة

الصبغية. إن الكروماتيدين (شقي الصبغي) المتآخيين هما نسختان من صبغي واحد، متصلين معا بالقسيم المركزي و يشكلان صبغيا مضاعفا واحدا.

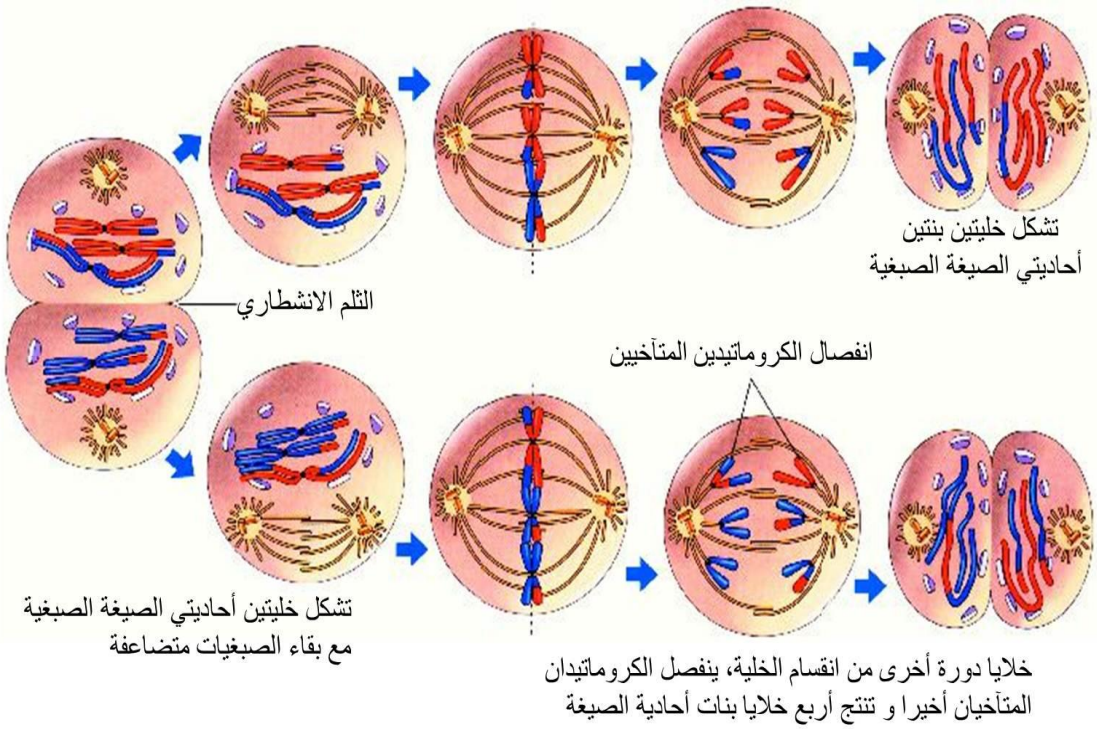
و على العكس فان الصبغيين في الزوج المتماثل هما صبغيان مفردان تم توارثهما من والدين مختلفين و هما في العادة ليسا متصلين ببعضهما. ان الشكل (80 أ –ب) يصف بالتفصيل مرحلتي الانقسام المنصف في خلية حيوانية عددها الصبغي المضاعف هو 6. ينصف الانقسام المنصف اجمالي عدد الصبغيات بطريقة نوعية جدا مخفضا عدد الطواقم الصبغية من اثنين الى واحد، يذهب كل منها الى خلية بنت مستقبلة.



الشكل (79): نظرة شاملة على الانقسام المنصف و كيف يختزل العدد الصبغي. بعد تضاعف الصبغيات في الطور البني تنقسم الخلية مرتين فتثمر أربع خلايا بنات أحادية الصيغة الصبغية. ان هذا الشكل يوضح سير زوج واحد من الصبغيات المتماثلة فقط. لقد جرت وراثة الصبغي الأحمر من الأنثى و الصبغي الأزرق من الذكر.



الشكل (80- أ): استكشاف الانقسام المنصف الأول في خلية حيوانية (يفرق الصبغيات المتماثلة)



الشكل (80- ب):استكشاف الانقسام المنصف الثاني في خلية حيوانية (الانقسام المنصف الثاني يفرق الكروماتيدين الشقيقين).

❖ الانقسام المنصف الأول Miosis-I

يشتمل الانقسام المنصف الأول على الأطوار نفسها التي يمر بها الانقسام الخيطي أو العادي و هي:

- الطور الطليعي أو التهيدي، – الطور الطليعي أو التمهيدي Prophase، – الطور التالي أو طور تكوين المغزل (الطور الاستوائي)Metaphase ،– الطور الانفصالي أو طور الهجرة Anaphase، – الطور النهائي أو طور التباعدTelophase.

الطور البيني Interphase

1- تنتسخ الصبغيات خلال الطور S و لكنها تبقى غير متكثفة.
2- يتألف كل صبغي متضاعف من كروماتيدين متآخيين، متطابقين وراثيا و متصلين عند القسيم المركزي.
3- يتضاعف الجسيم المركزي معطيا جسيمين مركزيين.

الطور الطليعي أو التمهيدي Prophase و يشتمل هذا الطور عددا من المراحل و هي:

أ- مرحلة الخيوط الرفيعة Leptonema

في بدء هذه المرحلة، تصبح الصبغيات مرئية كخيوط دقيقة من الكروماتين، و ذلك في مطلع الطور الطليعي من الانقسام المنصف ، يكون عدد الصبغيات آنئذ عددا ثنائيا. و يلاحظ أثناء هذه المرحلة اتجاه الصبغيات في داخل النواة اتجاها معينا، حيث تتلاقى نهايات الصبغيات في جانب واحد من جوانب النواة، الجانب الذي يكون قريبا من نقطة توضع الجسيم المركزي Centrosome ، و تحقق شكل الباقة (ومن هنا أتى تعبير الباقة كاسم لهذه المرحلة).

ب- مرحلة الخيوط المتزاوجة Zygonema:

في هذه المرحلة، فان الصبغيات المتماثلة التي بقيت خلال الانقسام العادي مفترقة تماما تقترب الواحدة من الأخرى و تنتظم في أشفاع، و يصبح الصبغيان المتماثلان منطبقين على بعضهما في نقطة معينة، و نعني

بذلك في النهاية القريبة من الجسيم المركزي. و يلي ذلك مباشرة اتصال الصبغيين ببعضهما طوليا. و تعرف حادثة التصاق الصبغيين المتماثلين في الشفع الواحد باسم الاقتران الصبغي Synapsis ، و يعتبر الاقتران الصبغي أكثر ظاهرات الانقسام المنصف أهمية.

ت- مرحلة الخيوط الثخينة Pachynema

يصبح الصبغيان المتماثلان في هذه المرحلة ملتفين حلزونيا على بعضهما، بحيث يصعب تمييز أحدهما عن الآخر، و يبدوان و كأنهما قد شكلا خيطا كثيفا واحدا. و يقابل عدد الخيوط الثخينة نصف عدد الخيوط الدقيقة، التي كانت قد ظهرت في مرحلة الخيوط الرفيعة.

و يتم خلال مرحلة الخيوط الثخينة انشطار صبغيي الشفع الواحد انشطارا طوليا، و يصبح الخيط الكثيف الواحد مؤلفا من أربعة شطور Chromatids ، لا تزال تتصل ببعضها.

و بشكل تفصيلي فإن ما يحدث في الطور الأول(I) Prophase هو ما يلي:

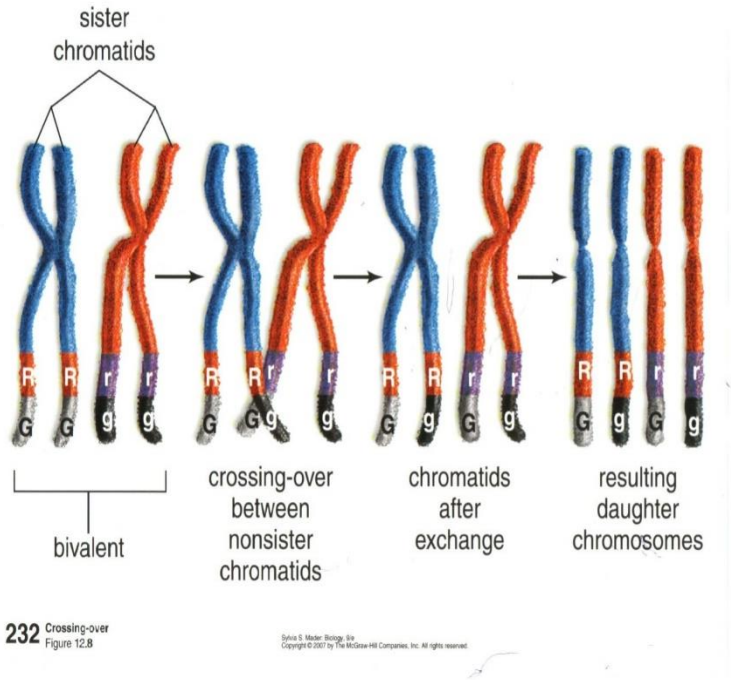
1- يشغل هذا الطور أكثر من 90% من الوقت الذي يتطلبه الانقسام المنصف.
2- تبدأ الصبغيات بالتكثف
3- تتزاوج الصبغيات المتماثلة بشكل رخو على مدى أطوالها و ترتصف مورثة بعد مورثة بشكل دقيق.
4- في التعابر cross- over تتقطع جزيئات الدنا في الكروماتيدين اللا متآخيين عند أماكن متناظرة ثم تعود للارتباط مع دنا آخر.
5- في التشابك تتكون بنية بروتينية تسمى المعقد المشبكي الخيطي بين المتماثلات بحيث تمسكها معا بشكل وثيق على مدى أطوالها.

6- يختفي المعقد المشبكي الخيطي في آخر الطور الأول و يصبح كل زوج صبغي مرئيا في المجهر كمجموعة رباعية مؤلفة من أربع كروماتيدات.

7- تملك كل رباعية تصالبا أو أكثر، تدعى مناطق التعابر.

8- تمسك المتماثلات مع بعضها حتى طور الصعود.

9- تحدث حركة الجسيمات المركزية، و تتشكل أنيبيبات مغزلية و يتلاشى الغلاف النووي، و تتشتت النويات كما في الانقسام الخيطي.



الشكل (81): تمثيل يوضح حادثة التصالب و التبادل بين صبيغي الصبغيين في ثنائية التكافؤ.بعد أن يتقابل الصبغيان المتماثلان، يتقاطع أحد الصبيغيين في الصبغي الواحد مع صبيغي آخر من الصبغي الثاني، و يتبادلان قطعا تكون عادة متساوية.

و يحدث أثناء التصاق الشطور الأربعة للشفع الواحد انكسارها إلى قطع، تعود لتلتحم مع بعضها في أربعة شطور جديدة. وعلى هذا النحو فان قطعا من أحد شطري الصبغي الواحد في الشفع تأتي الآن لتلتحم متبادلة مع قطع تقابلها في أحد الشطرين الآخرين للصبغي الآخر (الشكل 81). و تعرف هذه الظاهرة باسم التصالب و التبادل الصبغي Crossing-over .

ث- مرحلة الخيوط المتضاعفة Diplonema

ما أن تنتهي مرحلة الخيوط الثخينة حتى يأخذ شطرا كل ثنائية بالابتعاد عن بعضهما، و كأن قوى التجاذب، التي أدت إلى التصاق الصبغيين المتماثلين أثناء حادثة الاقتران الصبغي Synapsis ، قد استبدلت الآن بقوى تنافر. و يصبح الانشطار الطولي في كل صبغي من الصبغيات في هذه المرحلة واضحا. كما أن انفصال صبغي الشفع الواحد انفصالا طوليا يغدو متميزا. و على أية حال، تظل أقسام الخيط الصبغي المركب هذا متصلة ببعضها، و حيثما تم تصالب و تبادل صبغي يبقى الشطران اللذان عانيا التبادل متصلين ببعضهما بنقطة التصالب.

الطور التالي Metaphase (I):

1- تنتظم أزواج الصبغيات المتماثلة في رباعيات على صفيحة الطور التالي مع صبغي واحد من كل زوج يواجه كل قطب.
2- يرتكز الكروماتيدان في الصبغيات المتماثلة على انيبيبات المغزل من أحد القطبين، أما المتماثلة الأخرى فترتكز على أنيبيبات من القطب المقابل.

طور الصعود Anaphase (I)

1- تتحرك الصبغيات باتجاه الأقطاب يقودها الجهاز المغزلي.
2- يبقى الكروماتيدان المتآخيان متصلين عند القسيم المركزي و يتحركان كوحدة مفردة باتجاه نفس القطب.

3- تتحرك الصبغيات المتماثلة التي يتألف كل منها من كروماتيدين متآخيين نحو قطبين متقابلين.

الطور النهائي Telophase(I)

1- في بداية الطور النهائي يكون لكل نصف من الخلية طاقم مكتمل من الصبغيات. و لا يزال كل صبغي يتألف من كروماتيدين متآخيين.

2- الانقسام السيتوبلاسمي يحدث عادة متزامنا مع الطور النهائي مشكلا خليتين بنتين.

3- في الخلايا الحيوانية يتشكل الثلم الانشطاري، أما في الخلايا النباتية تتشكل صفيحة الخلية.

4- في بعض الأنواع و ليس كلها، يزول تكثف الصبغيات و يعاد تشكيل الغلاف النووي و النوية.

5- لا يحدث تضاعف للصبغي بين نهاية الانقسام المنصف الأول و بداية الانقسام المنصف الثاني، لأن الصبغيات قد تضاعفت.

❖ **الانقسام المنصف الثاني:**

الطور الأول Prophase (II)

1- يتشكل الجهاز المغزلي.

2- في أواخر الطور الأول تتحرك الصبغيات و هي لا تزال تتألف من كروماتيدين اثنين باتجاه الصفيحة الاستوائية.

الطور التالي Metaphase (II)

1- تتوضع الصبغيات على صفيحة الطور التالي كما في الانقسام الخيطي.

2- بسبب التعابر للانقسام المنصف الأول لا يكون الكروماتيدان المتآخيان لكل صبغي متآخيين لكل صبغي متطابقين جينيا.

3- يلتصق الحيزان الحركيان في الكروماتيدين المتآخيين بأنيبيبات ممتدة من القطبين المتقابلين.

طور الصعود Anaphase (II)

1- أخيرا ينفصل القسيمان المركزيان لكل صبغي، و يتباعد الكروماتيدان المتآخيان.

2- يتحرك الآن الكروماتيدان المتآخيان كصبغيين منفردين باتجاه القطبين المتقابلين.

الطور النهائي Telophase(II)

1- تتشكل النوى، و يبدأ تكثف الصبغيات بالزوال، و يحدث الانقسام السيتوبلاسمي.

2- ان انقسام خلية لأحد الأبوين انقساما منصفا ينتج أربع خلايا بنات، لكل منها طاقما صبغيا أحادي الصيغة و غير متضاعف.

3- تتميز كل من الخلايا البنات الأربع وراثيا عن الخلية البنت الأخرى و عن الخلية الأم.