كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الاولى

المادة : علم الحياة الحيوانية١

المحاضرة : الاولى/نظري/ د . فيينا

علم الوراثة

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

مبادئ علم الوراثة

يبحث علم الوراثة في انتقال الخصائص الوراثية من الآباء الى الأبناء ، ويعد هذا العلم من العلوم البيولوجية الحديثة التي تطورت تطورا سريعاً في الآونة الأخيرة وخاصة على المستوى الجزيئي، يهتم علم الوراثة بالتشابهات والاختلافات وطريقة انتقال الصفات من جيل لآخر ، وكيفية تعبير المورثات عن هذه الصفات خلال مراحل تشكل ونمو الفرد.

يعتمد فهم علم الوراثة على فهم العلوم البيولوجية الأخرى مثل علم الخلية وعلم التطور وعلم الكيمياء الحيوية وعلم الجنين الجزيئي . اعتمد علم الوراثة في تطوره على علم الرياضيات في حساب الاحتمالات الوراثية وعلى العلوم الحديثة مثل علم الاتصالات والتكنولوجيا ، فبدأ علم الوراثة يأخذ شكلا جديدا في التطور ، فأصبحت خطواته التطورية سريعة ومتساوية جداً ، وطرق أبواب الكثير من العلوم التطبيقية مثل العلوم الطبية والصيدلانية والزراعية والقضائية أيضاً ، فبدأت البشرية تولي هذا العلم أهمية خاصة تميزه عن باقي العلوم ، وأصبح ملايين البشر من المرضى وغير المرضى يعلقون آمالهم وآلامهم عل تطور هذا العلم .

لمحة تاريخية: كان علم الحياة (البيولوجيا) بجميع فروعه منغلقاً على ذاته في الفترة الزمنية الواقعة بين الثورة الصناعية التي حدثت في القرن السابع عشر ميلادي حتى بداية القرن العشرين واعتبر بعض العلماء أن البيولوجيا من العلوم الدنيا التي لا قيمة لها وكان اهتمام البشرية منصباً وموجهاً نحو علم الفيزياء والكيمياء والفلك والميكانيك ، بسبب استناد هذه العلوم على القوانين الرياضية.

حاول بعض علماء البيولوجيا الانطلاق بعلم الوراثة بعد اكتشافهم لأهمية قوانين ماندل الوراثية في بداية القرن العشرين ولكن دون جدوى، وخصوصاً عندما وقع علم الوراثة في قبضة الساسة في الدول العظمى في الفترة الواقعة ما بين الحرب العالمية الأولى والثانية.

قام رؤساء وحكومات الدول العظمى أمثال ألمانيا وأمريكا وبريطانيا وقتئذ بتجنيد علماء البيولوجيا للعمل في مجال الوراثة البشرية، ونجحوا في تحويل علم الوراثة من المنطق العلمي والبحث

المنهجي السليم الذي يخدم البشرية جمعاء الى خدمة الأفكار العنصرية والتمييز الطبقي التي كانت سائدة ورائجة في تلك الفترة الزمنية داخل مجتمعاتهم ذاتها.

وهكذا أصبح علم الوراثة سيفاً حاداً مسلطاً على رقاب أفراد المجتمع البشري من الطبقات الدنيا. وبدأت البشرية وكثير من علماء البيولوجيا بالابتعاد عن هذا العلم والنفور منه بسبب الممارسات السلبية التي استغلت علم الوراثة أسوء استغلال في تاريخ الانسانية .

لقد طرح عالم البيولوجيا فرنسيس غالتون فكرة تحسين النوع البشري بهدف تحسين سلالة الانسان باستخدام علم الوراثة عن طريق ابعاد الصفات البشرية السيئة والعمل على التخلص من البشر الحاملين لهذه الصفات ، وفهم الساسة وطبقة النبلاء والطبقة المتوسطة في مجتمعات الدول العظمى هذه الصفات بطريقة خاطئة ، فكان الفقر والجهل وعدم التعلم والبشرة الداكنة أو السوداء ومرض السكر والتخلف الذهني والاعاقة من الصفات غير المرغوب فيها في مجتمعاتهم وبالفعل بدأت الدول العظمى بالتخلص من بعض هؤلاء الأشخاص وأصدرت الأحكام القضائية لذلك.

الماندلية أو علم التهجين:

يرتبط انتقال الخصائص الوراثية الحيوية من جيل لآخر بعملية التكاثر ، لذلك لابد من عرض موجز عن التكاثر لفهم عملية التهجين ومعالجتها على أسس علمية موضوعية واضحة.

التكاثر Reproduction

يعد التكاثر من الصفات الأساسية لدى الكائنات الحية ، لأنه الوسيلة الضرورية للمحافظة على استمرار النوع ، ويوجد عدة أنماط من التكاثر لدى كافة الأنواع الحية وهي:

1-التكاثر الجنسي: تبدأ دارة التكاثر الجنسي باتحاد الأعراس وتنتهي بالانقسام المنصف *Meiosis* الذي يؤدي الى انتاج الأعراس من جديد.

وتتلخص أهمية هذا التكاثر في النقاط التالية:

أ–التكاثر الجنسي هو الوسيلة الوحيدة للتكاثر في النوع البشري والحيوانات العليا والنباتات الراقية، حيث تتركز فيها معظم الدراسات الوراثية الهامة.

ب– يوفر التكاثر الجنسي أفضل الشروط للدراسات الوراثية من خلال تعقب الفوارق بين الأجيال المتعاقبة.

ج– يقدم التكاثر الجنسي تقنية لدراسة العمليات الوراثية عن طريق توفير الفرص العديدة المناسبة لمثل هذه الدراسات ، فيؤدي ذلك الى فهم لآلية انتقال المحددات الوراثية.

2–التكاثر اللاجنسي : يبدأ هذا التكاثر من الخلايا الجسمية دون الحاجة الى انصهار العروس الذكرية مع الأنثوية . يوجد لدى النباتات مثل الفريز والكرمة وبعض الأحياء الدنيا مثل الجراثيم ، وتكون العضوية الجديدة شبيهة تماماً بأمها وتحمل ذات الصفات الوراثية.

3– التوالد البكري: تبدأ دارة التكاثر من البويضات غير الملقحة كما هو الحال عند ذكر نحل العسل ، ولا يعد هذا التكاثر تكاثراً لا جنسياً بسبب توفر أحد عناصر التكاثر الجنسي فيه وهو البويضة ، ولا يعد تكاثراً جنسياً لأن البويضة لا تلقح بالنطفة.

4– التكاثر الشبيه بالجنسي: وهو التكاثر الذي ينتج صيغة صبغية أحادية ناتجة من سلالات خلوية ذات صيغة صبغية أحادية دون حدوث الانقسام المنصف ، حيث يتم تبادل العناصر الوراثية، ويمكن دراسة وتحري الاختلافات الوراثية من السلالات الجديدة. وينتشر هذا التكاثر بين الفيروسات والجراثيم والفطور.

الدارة الخلوية

يتكون جسم الكائن الحي نباتاً أو حيواناً من مجموع خلوي ينشأ من خلية واحدة ، تمر هذه الخلية خلال مراحل تشكل الكائن بعدد كبير من الانقسامات الخلوية وتخضع الخلية في حياتها الى ما يسمى بالدارة الخلوية التي تتكون بدورها من عدة أطوار كما في الشكل (1). ويختلف زمن كل طور عن الآخر هذا من جهة ومن جهة أخرى يختلف زمن الدارة الانقسامية حسب نوع الخلايا في العضوية الواحدة ، وذلك حسب الدور أو الوظيفة التي تقوم بها هذه الخلايا أو تلك، وتقسم الدارة الخلوية عموماً الى :

- طور الانقسام ويرمز له بـ M وهذا بدوره ينقسم الى أربعة أطوار

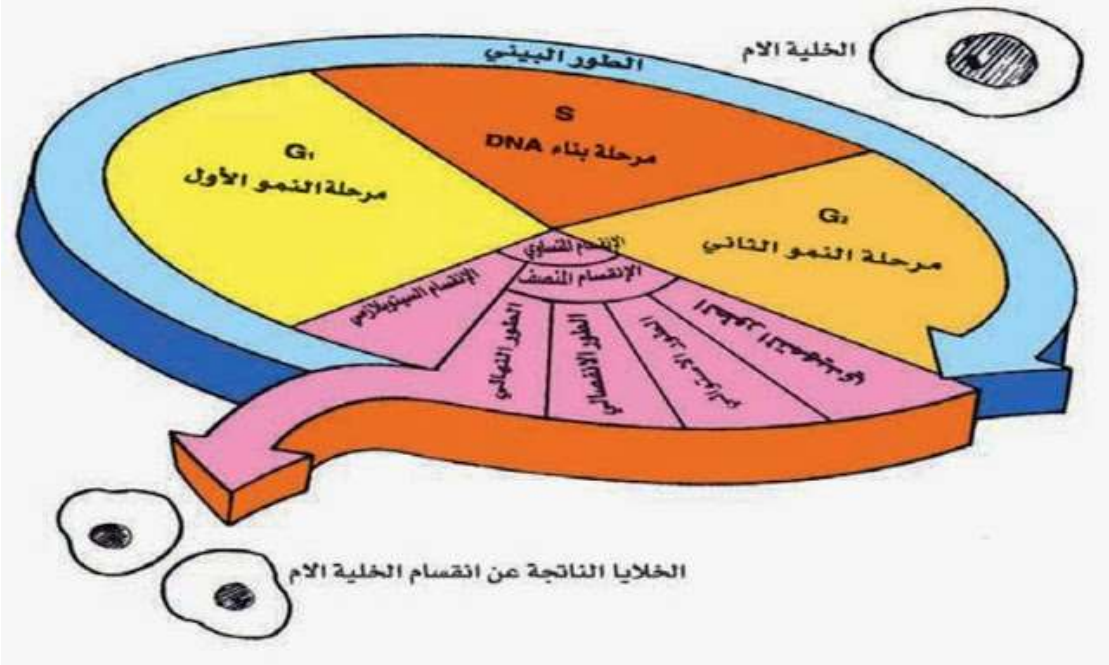
- الطور البينيInterphase : وهو الطور الذي يفصل بين انقسامين متتاليين ويستغرق 90% من زمن الدورة ويقسم بدوره الى ثلاثة أطوار جزئية هي:

1- الفضوة الأولى Gap1 (G_1) : هي الفترة الزمنية التي تقوم الخلية خلالها بوظيفتها الفيزيولوجية حيث يتضاعف عدد عضيات الخلية وأنزيماتها وبالتالي يزداد حجم الخلية .

2-مرحلة التركيب Synthesis (S) : مرحلة تصنيع الـ DNA وتضاعفه استعداداً لانقسام الخلية بفعل أنزيم DNA Polymerase و DNA Ligase. يبدأ تضاعف الـ DNA قبل حوالي (5-10) ساعات من بدء الانقسام الخيطي، ويكتمل في غضون (4-8) ساعات. ويتشكل بنتيجة ذلك نسختين متماثلتين تماماً من كامل الـ DNA ويلي عملية نسخ الـ DNA عملية نسخ الصبغيات ويدعى الصبغيان المتشكلان حديثاً بشقي الصبغي أو الصبيغيين Chromatids ويبقيان مرتبطين مع بعضهما في سوية القسيم المركزي Centromere الخاص بكل صبغي.

3- الفضوة الثانية Gap2 (G_2): وفترتها قصيرة تسبق بدء الانقسام وهي فترة تهيئة كامل مكتنفات الخلية للدخول بالانقسام الخلوي.

- ويمكن تحديد وحساب زمن استمرار أطوار الدارة الخلوية من خلال تحضير الشرائح التي تحتوي على الخلايا غير المنقسمة والخلايا المنقسمة بعد معالجتها بالكولشيسين وتلوينها.



الشكل (1) أطوار الدارة الانقسامية الخلوية

انقسام الخلية Cell Division

يحدث النمو في الكائنات الحية بازدياد حجم الخلايا وازدياد عددها ، تتم زيادة الحجم عن طريق العمليات الحيوية والحيوية الكيميائية ، أما زيادة العدد فتتم عن طريق انقسام الخلايا بعد تضاعف الـ DNA فيها لتأمين انتقال كامل للمادة الوراثية للخلايا البنات ، وتتم هذه العملية بدقة متناهية مع وجود بعض الاستثناءات أو الشذوذ.

جميع الخلايا الحية باستثناء الخلية العصبية المتمايزة قابلة للانقسام ويوجد نوعان من الانقسامات : الانقسام الخيطي المتساويMitosis (الذي يحدث في الخلايا الجسدية في الكائنات الحية) والانقسام المنصف Meiosis (الذي يحدث في الخلايا التناسلية للكائنات الحية).

الهدف من الانقسام الخلوي

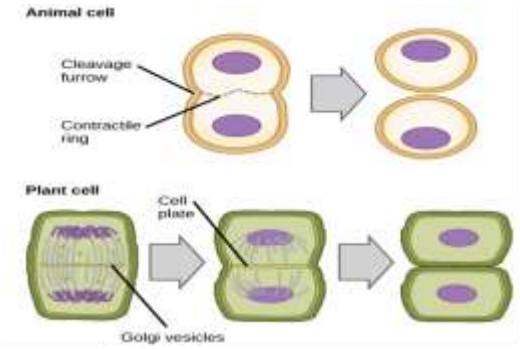
- نمو الكائن الحي (عديد الخلايا)
- تعويض الخلايا التالفة

- تكوين الأمشاج
- التكاثر وزيادة الأعداد (في الكائنات وحيدة الخلية)

الانقسام الخيطي أو المتساوي Metosis:

وتكمن أهمية الانقسام الخيطي في إنه يساهم في نمو الكائنات الحية وتعويض أنسجتها التالفة، كما يساهم في نقل الجينات الموجودة على الكروموسومات من الخلية الأصلية إلى الخليتين الجديدتين.

وبالطبع فإن الانقسام الخيطي يختلف في الخلية النباتية عنه في الخلية الحيوانية، فالخلية النباتية لا تحتوي على جسم مركزي (حيث يلعب الجسم المركزي دوراً في انقسام الخلية الحيوانية، حيث ينقسم إلى قسمين، ويهاجر كل قسم إلى أحد قطبي الخلية. ويبدأ في هذا الدور تكثف خيوط سيتوبلازمية بين الجسمين المركزين، تسمى هذه الخيوط بالمغزل)، كما أنه لا يحدث اختناق في الخلية النباتية إنما تتشكل انتفاخات غشائية من جهاز غولجي على الخط الاستوائي للخلية وتمتد هذه الانتفاخات حتى تشكل حاجزاً يسمى بالصفيحة الوسطى والتي تقسم الخلية إلى خليتين.

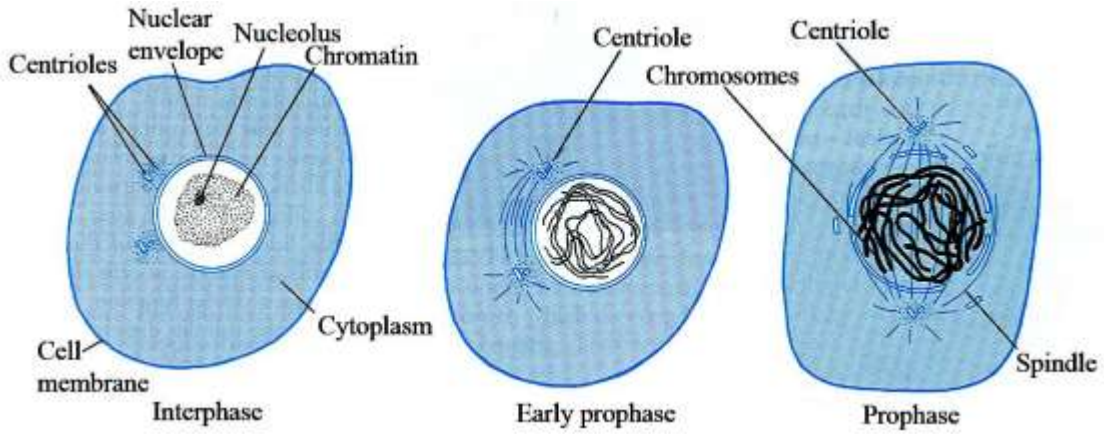


شكل يوضح مراحل الانقسام الخيطي في الخلايا الحيوانية والنباتية

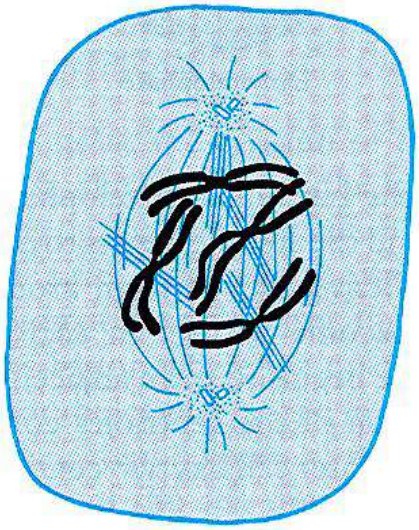
أطوار الانقسام المتساوي

1- **الطور التمهيدي(الطليعي)Prophase:** وهو أطول الأدوار، وبدوم حوالي نصف مدة الانقسام الخيطي، وتحدث خلاله تبدلات عميقة في كل من نواة الخلية والسيتوبلاسما. حيث

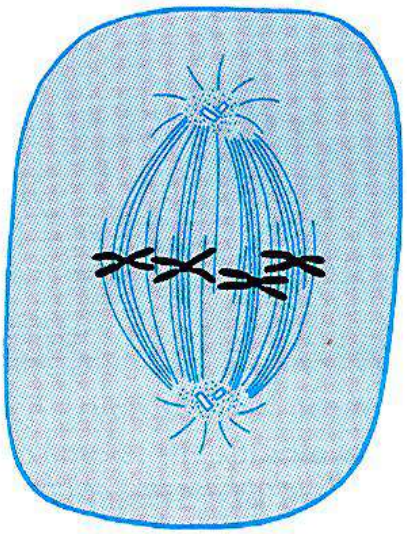
تبدأ الخيوط الصبغية بالتكثف والتقاصر والثخن تدريجياً. وتبدو عندئذٍ مرئية تحت المجهر. وفي نهايته تصبح الخيوط الصبغية أكثر تقاصراً ، ويظهر كل كروموسوم مكونا من جزئيين، ويدعى كل جزء كروماتيد Chromatidsويرتبط الكروماتيدان مع بعضهما في نقطة تسمى بالسنترومير(الجزء المركزي) يظهر زوج من الجسيمات المركزية centrioles في الخلية الحيوانية على إحدى حافتي النواة إلى الخارج من الغشاء النووي بينما لا يمكن ملاحظة هذه الجسيمات المركزية في الخلايا النباتية. يتم خلال الطور التمهيدي انتقال زوج الجسيمات المركزية بشكل متعاكس إلى قطبي الخلية(كل جسيم مركزي في اتجاه الى أحد قطبي الخلية) ، ويظهر أيضاً مغزل الانقسام ممتداً بينهما. كما تختفي النويات، ويتجزأ الغلاف النووي ويختفي كلياً في نهاية هذا الدور مما يؤدي إلى اختلاط العصارة النووية بالسيتوبلاسما.



الطور الاستوائي: يكتمل في هذا الدور تشكل المغزل اللالوني (جهاز الانقسام). وتتميز الكروموسومات في هذا الدور ويصبح من السهل عدها وتحديدها وتنتظم على خط استواء الخلية مشكلة "اللوحة الاستوائية".



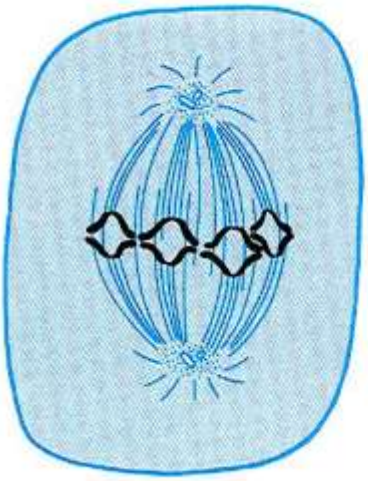
Early metaphase



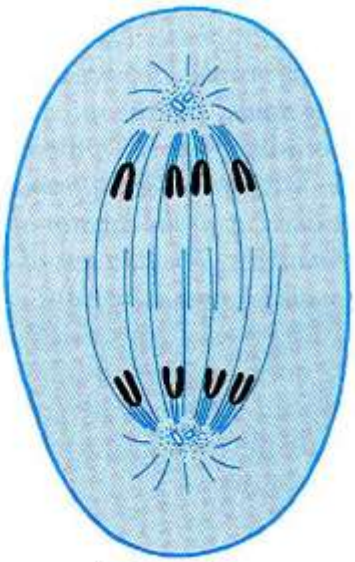
Metaphase

الطور الانفصالي: ينفصل السنترومير في هذا الدور، ويبتعد الكروماتيدان في كل كروموسوم عن بعضهما، ويتجه كل كروماتيد مبتعاً عن شقيقه نحو أحد القطبين. وبذلك يصبح عند كل قطب من قطبي الخلية مجموعتان متشابهتان من الكروموتيدات، ليتحول لاحقاً كل كروماتيد الى صبغي كامل مع وصوله الى محطته النهائية وهي قطب الخلية.

لقد تبين أن الصبغيات الجديدة تنتقل إلى أحد قطبي الخلية عن طريق تحرك مريكزاتها أولاً ثم يعقبها الأذرع.

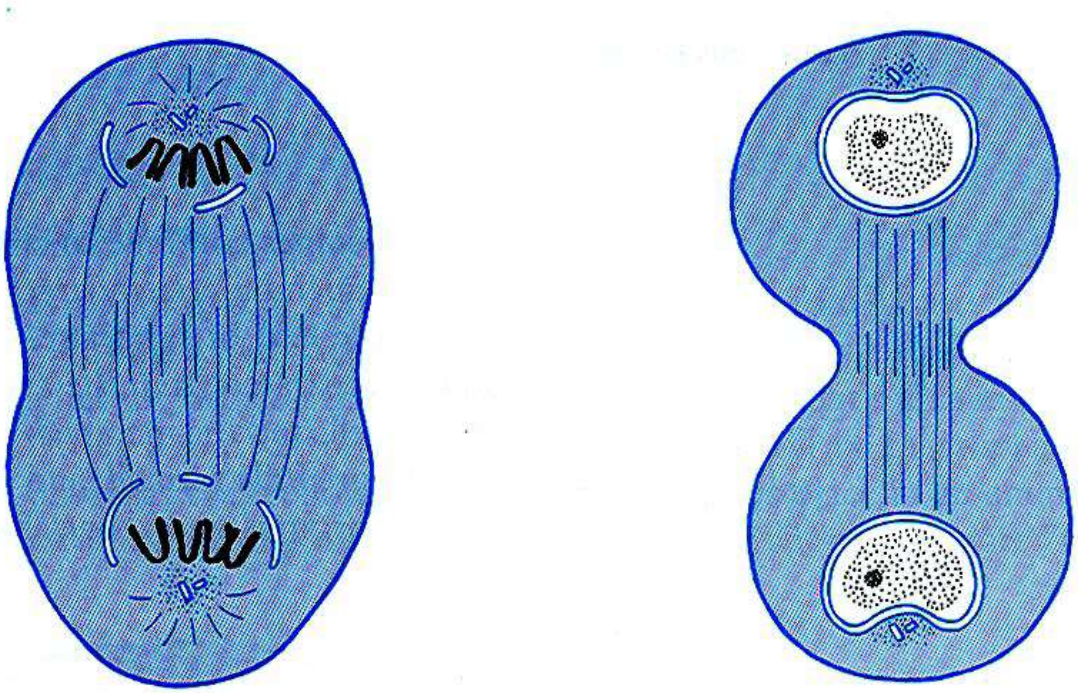


Early anaphase



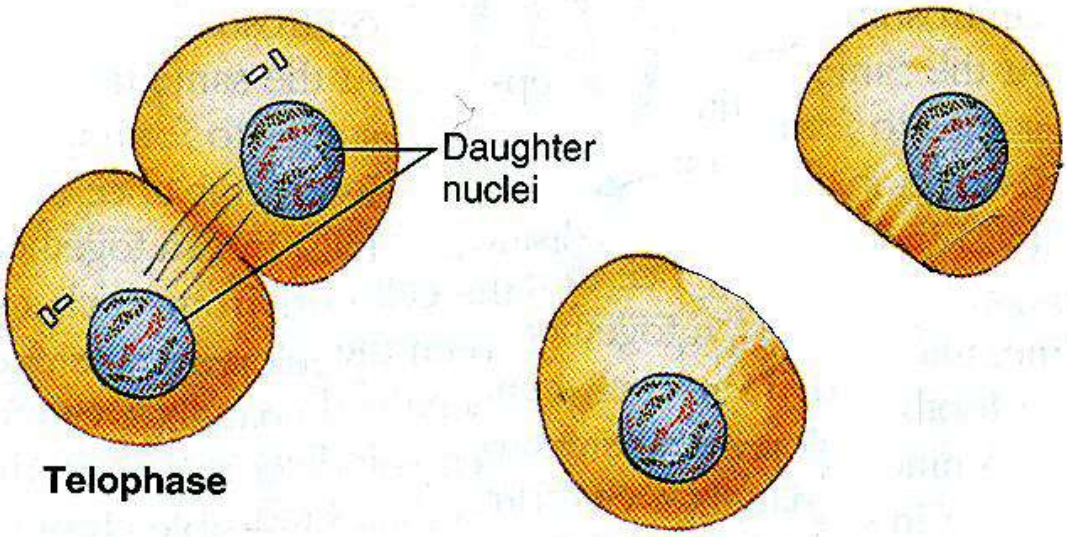
Late anaphase

الطور النهائي: بعد اختفاء خيوط المغزل اللالوني؛ تظهر الصفيحة الخلوية مقسمة الخلية إلى نصفين في الخلية النباتية وتختنق في المنتصف بالنسبة للخلية الحيوانية ، تبدو مجموعة الكروموسومات في كل قطب طويلة ورفيعة، ليبدأ عندها المغزل بالاختفاء تدريجيا عن طريق انحلال أليافه ، وتبدأ الصبغيات بالاختفاء والتحلل متحولة الى مادة نووية منحلة، كما يلاحظ البدء في تشكل النويات داخل كل من النوى الجديدة المتشكلة، وتتشكل خليتان بنتان متماثلتان.



انقسام السيتوبلازم (cytokinesis) : هي عملية تحدث في الخلايا حقيقية النوى، حيث يظهر في المراحل النهائية للانقسام النووي(الانقسام الخيطي)ثلم سطحي في منتصف الخلية، ليبدأ هذا الثلم بالتعمق أكثر فأكثر ليقطع الغشاء السيتوبلاسمي وليشطر السيتوبلاسم، ثم يلتحم طرفي الغشاء لتنفصل الخلية الأم إلى خليتين جديدتين.

وهي عادة ما تحدث في المراحل المتأخرة من الانقسام المتساوي، وأحيانا المنصف، يبدأ الانشطار السيتوبلاسمي دائما في المنطقة الوسطى من المغزل التي يتم فيها تداخل الألياف القطبية للمغزل مع بعضها حيث تنفصل الخلية في الانقسام المتساوي إلى خليتين لكي تضمن أن عدد كروموسومات سيتم الحفاظ عليه من جيل إلى الجيل الذي يليه. بعد انقسام السيتوبلازم تنتج خليتان وليدتان تدخلان الطور البيني، لتكوين نسخ طبق الأصل عن الخلية الأصلية الأم.



الانقسام الاختزالي

تتكاثر بعض الكائنات الحية تكاثراً لا جنسيا إلّا أنّ معظم الحيوانات تتكاثر جنسيّاً، ويحدث التّكاثر الجنسي باندماج خلية جنسيّة أنثويّة (عروس أنثوية)، مع خلية جنسيّة ذكريّة (عروس ذكرية) لإنتاج الزّايجوت (البويضة الملقحة) التي تنمو وتتطور لفرد جديد. تنتج الأعراس الأنثويّة والذّكريّة عن انقسام الخلايا في الغدد التناسليّة انقساماً اختزالياً، أو انقساماً(Meiosis) ، ويُسمى بهذا الاسم لأنه يختزّل عدد الكروموسومات في الخليّة إلى النّصف، وهو بذلك يختلف عن الانقسام المتساوي (Mitosis) الذي ينتج عنه خلايا تحتوي على كرموسومات مساوية لعدد الكروموسومات في الخليّة الأصليّة.

تتكوّن أجسام الحيوانات من خلايا ثنائيّة المجموعة الكروموسوميّة(Diploid)، وللمحافظة على عدد الكروموسومات ثابتاً في أفراد النوع الواحد من الكائنات الحيّة، فلا بُدّ من حدوث الانقسام الاختزالي لإنتاج أعراس أحاديّة المجموعة الكروموسوميّة (Haploid) .

تحتوي خلايا جسم الإنسان على سبيل المثال على 46 كروموسوم، وعند حدوث الانقسام الاختزالي، تُنتِج الأنثى أعراس تحتوي على 23 كروموسوم، وينتج الذكر أعراس ذكريّة تحتوي على 23 كروموسوم، وعند اندماجهما بعد حدوث الإخصاب تنتج البيضة الملقحة التي تحتوي من جديد على 23 زوج من الكرموسومات (46 كرموسوم) وهو العدد الأصلي لكروموسومات خلايا الإنسان.

مراحل الانقسام الاختزالي: تمر الخليّة التي تنقسم انقساماً اختزالياً بمرحلتين، وتتكوّن كل مرحلة من عدة أطوار تُنتِج في نهايتها أربع خلايا وليدة (أعراس) قبل أن تبدأ الخليّة بالانقسام تدخل في الطّور البينيInterphase وهو الطّور الذي تنمو فيه الخليّة، وتبني البروتينات، والحمض النّووي الرّايبوزي منقوص الأكسجين(DNA) ، ويتضاعف فيه عدد الكروموسومات تمهيداً للانقسام. يتكون الانقسام المنصف من انقسامين متتاليين يفصل بينهما طور بيني قصير

يتألف الانقسام الاختزالي من انقسامين نوويين متعاقبين، يُشار لهما باسم الانقسام الاختزالي الأولmiosisI والانقسام الاختزالي الثاني miosisII. تنفصل الصبغيات(الكروموزومات)القرينة

عن بعضها خلال الانقسام الاختزالي الأول، بينما تنفصل الصبيغيات(الكروماتيدات)ضمن الصبغي الواحد عن بعضها خلال الانقسام الاختزالي الثاني.

. الانقسام المنصف الأول: وهو انقسام اختزالي يسبقه تضاعف DNA الصبغيات، كما يتم فيه توزيع الصبغيات المتماثلة إلى خليتين أحاديتي الصيغة نتيجة اختزال العدد الصبغي إلى النصف.

. الانقسام المنصف الثاني: وهو انقسام خيطي متساوي غير مسبوق يتضاعف الـ DNA.

ينظم الانقسام المنصف ويضبط عملية توريث المادة الوراثية واختلاط الذخيرة الوراثية في الأبناء مما يؤدي إلى إعطاء صفات ظاهرية جديدة.

1- **الانقسام المنصف الأول** First meiotic Division: وهو يشبه الانقسام الخيطي إلا أن الدور الأول فيه يكون أكثر تعقيداً، ونميز فيه أربعة أدوار.

- الدور الأول Prophase I : ويشكل أهم أدوار الانقسام المنصف ويمكن تقسيمه إلى خمسة مراحل تبعاً لمظهر الصبغيات وشكلها وهي:

أ . مرحلة الخيوط الرفيعةLeptotene stage : تبدو الخيوط الصبغية في هذه المرحلة رفيعة طويلة وشديدة التمدد، صعبة التمييز عن بعضها تحمل عقداً كثيرة هي الحبيبات أو العقد الصبغية Chromomeres ، وتبقى النوية في جميع مراحل الطور التمهيدي. ويلاحظ أن الغلاف النووي والنويات مازالت مرئية في هذه المرحلة.

ب- **مرحلة الخيوط المتزاوجة**Zygotene: تتقارب الصبغيات المتماثلة من بعضها البعض لتحقق تقابلا صبغياً ومورثياً كاملاً وتسمى هذه العملية بالاقتران الصبغي Synapsis.ومن الصعب تمييز هذه المرحلة بالمجهر الضوئي.

ج-مرحلة الخيوط الثخينة Pachytene : تقصر الصبغيات نتيجة التفاف وتحلزن الصبغيين المزدوجين. ويرتبط زوج الصبيغيات الشقيقة للصبغي القرين مع زوج الصبيغيات الشقيقة للصبغي القرين الآخر مشكلة بذلك رباعيات صبغية Tetrads أو ثنائيات صبغية متكافئة ،

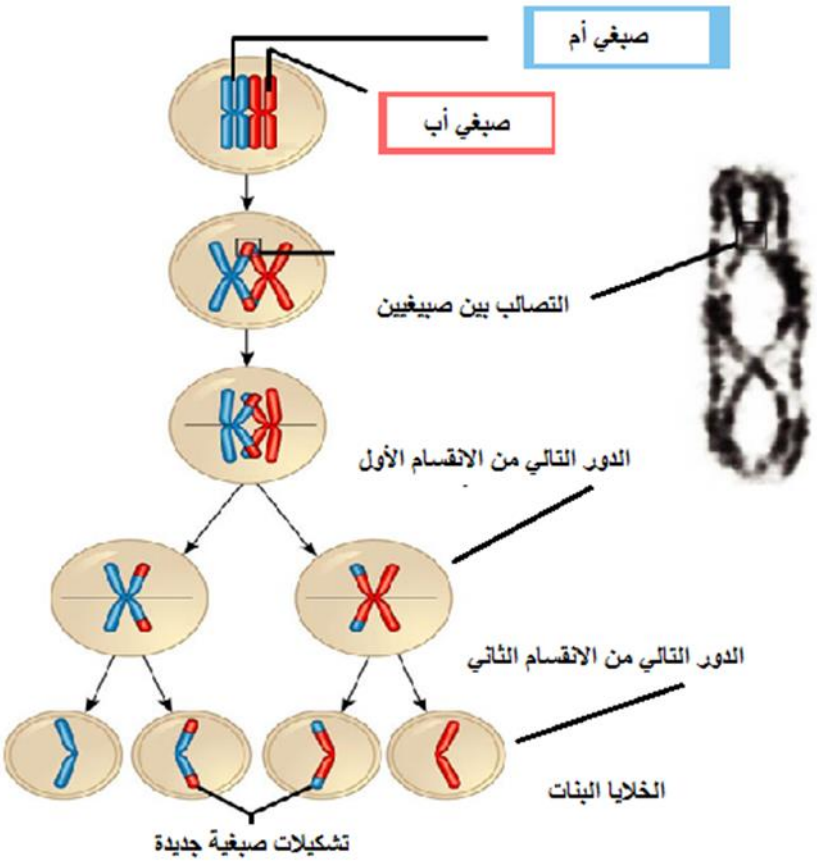
ويحدث خلال هذه المرحلة تبادل للمادة الوراثية بين الصبيغيات غير الشقيقة التابعة لزوج الصبيغيات الشقيق نتيجة حادثة العبور الصبغي Crossing –over. الشكل (1)

وتعد هذه الظاهرة ذات أهمية بالغة في اختلاط الذخيرة الوراثية للأبوين وفي تبادل العوامل الوراثية، وتنوع الأحياء التي تتكاثر تكاثراً جنسياً. ويمكن رصد هذه المرحلة بالمجهر الضوئي.

فالمورثات المحمولة على الصبغي نفسه تكون مرتبطة Linked وهي مضطرة للتوزع معاً أثناء الانقسام المنصف، على عكس المورثات المحمولة على صبغيات مختلفة حيث تتوزع بصورة مستقلة (قانون مندل الثاني).

د – **مرحلة الخيوط المتضاعفة** Diplotene stage: بعد إتمام تبادل القطع بين الصبغيات المتماثلة في المجموعات الرباعية، يبدأ كل صبيغيين في كل مجموعة رباعية بفك الالتفاف الحلزوني، ويبتعد كل صبغي بصبيغييه عن الصبغي القرين الآخر، وتبدو الصبغيات مشطورة طولياً بصورة جلية. مع ملاحظة العديد من مناطق التصالب Chiasmata بين الصبيغيات المتماثلة في الرباعيات والتي نتجت عن العبور. ويتوقف عدد نقاط التصالب على طول الثنائية، حيث يتراوح بين الواحدة وحتى عشرات النقاط. ثم تأخذ نقاط التصالب في التناقص التدريجي مع استمرار انفصال الصبغيين المتماثلين عن بعضهما، وتعرف هذه العملية بالانزلاق Terminalization. ويمكن رصد هذه المرحلة بالمجهر الضوئي.

الشكل (1)



تخطيط يوضح ظاهرة العبور خلال الانقسام المنصف.

هـ-**مرحلة التشتت(الافتراق)Diakinesis stage** : وخلال هذه المرحلة تستمر عملية الانزلاق حتى تختفي كل نقاط التصالب، وينفصل كل صبغيين متماثلين عن بعضهما تماماً، وهنا يبدو كل صبغي مكوناً من صبيغيين. وفي نهاية هذه المرحلة تصبح الصبغيات في أعلى درجة من الثخانة والقصر، وتكون مستعدة لدخول بقية أدوار الانقسام، ويختفي الغشاء النووي والنوية، ويظهر المغزل، وترتبط الصبغيات بأنيبباته. وهذه المرحلة تكون قصيرة عابرة في تكوين النطاف، وطويلة في تكوين البويضات.

الطّور الاستوائي الأول (Metaphase I):

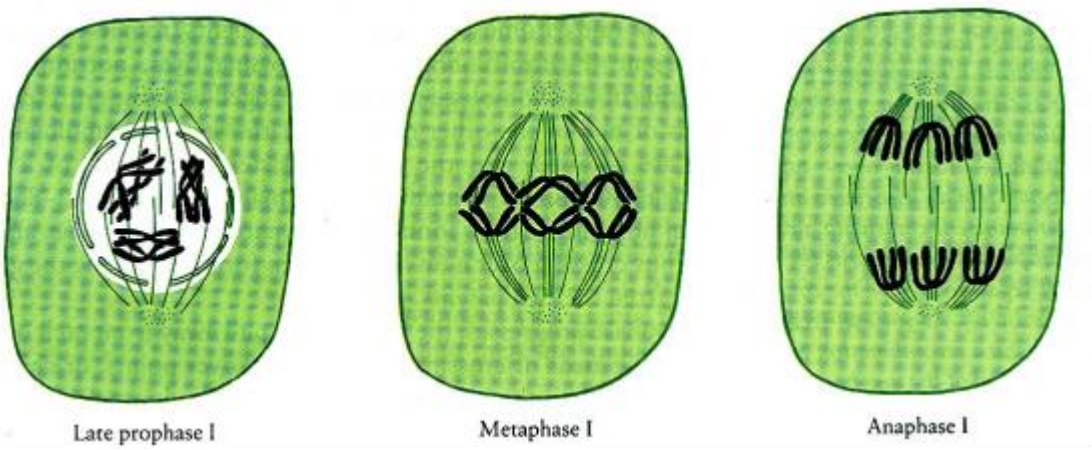
تصطف الرّباعيات في مركز الخليّة بحيث يواجه السّنترومير (القطعة المركزيّة التي تربط الكروماتيدَين ببعضهما) لأحد الكروموسومات أحد قطبي الخليّة، بينما يواجه سنترومير الكرموسوم المماثل القطب المعاكس.

الطّور الانفصالي الأول (Anaphase I) :

تنفصل الكروموسومات المتماثلة عن بعضها البعض، وتبدأ بالتوجّه نحو قطبي الخليّة، بينما تبقى الكرماتيدات الشّقيقة لكل كروموسوم متصلة ببعضها.

الطّور النّهائي الأول(Telophase I):

وتحدث فيه التّغيرات الآتية: تستمر الكروموسومات بالاتجاه نحو قطبيّ الخليّة حتى يجتمع في كل قطب نصف عدد الكرموسومات. يبدأ انقسام السيتوبلازم .(cytokinesis) ينتج عن انقسام السّيتوبلازم خليتان تحتوي كل منهما على نصف عدد الكرموسومات الأصلي، ويبدأ الاستعداد للمرحلة الثّانية من الانقسام الاختزالي دون حدوث تضاعف للمادة الوراثيّة.(DNA)



المرحلة الثّانيّة من الانقسام الاختزالي:

الطّور التّمهيدي الثّاني(Prophase II) وتحدث فيه التّغيُّرات الآتية:

تفكّك الغلاف النّووي والنّويات وتظهر شبكة الخيوط المغزليّة . تبدأ الكروموسومات بالتّوجّه نحو مركز الخليّة.

الطّور الاستوائي الثّاني(Metaphase II): وتحدث فيه التّغيُّرات الآتيّة:

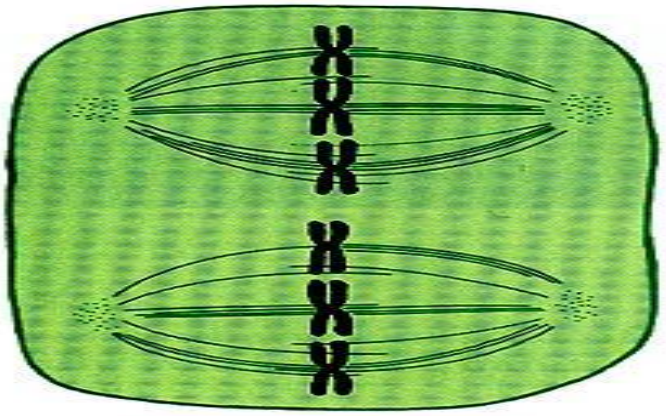
تصطفّ الكرموسومات في مركز الخليّة. تُشير ألياف الحيّز الحركي (kinetochore fibers) لكل من الكروماتيديَن الشقيقين باتجاهَين مُتعاكسَين؛ علماً أنّ الحيّز الحركي هو جزء من السّنترومير الذي يربط الكرماتيدَين معاً، وهو مكان ارتباط الخيوط المغزليّة التي ستعمل على فصل الكروماتيدات عن بعضها).

الطّور الانفصالي الثّاني (Anaphase II) ويحدث فيه ما يلي:

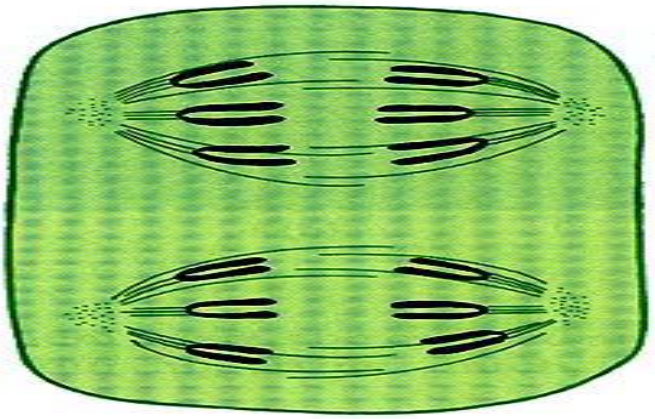
تنفصل الكروماتيدات الشّقيقة عن بعضها وتبدأ بالتوجّه نحو قطبي الخليّة، ويمثّل كل كروماتيد منها كرموسوماً كاملاً، وتُسمّى في هذه المرحلة الكروموسومات الوليدة Daughter) chromosomes).تتمدّد الألياف المغزليّة غير المتصلة بالكروماتيدات؛ ممّا يؤدّي إلى استطالة الخليّة. تبدأ أقطاب الخليّة بالتّباعد عن بعضها. تتجمع الكروموسومات الوليدة عند قطبي الخليّة في نهاية الطّور الانفصالي الثّاني.

الطّور النّهائي الثّاني(Telophase II) : وتحدث فيه التّغيُّرات الآتية:

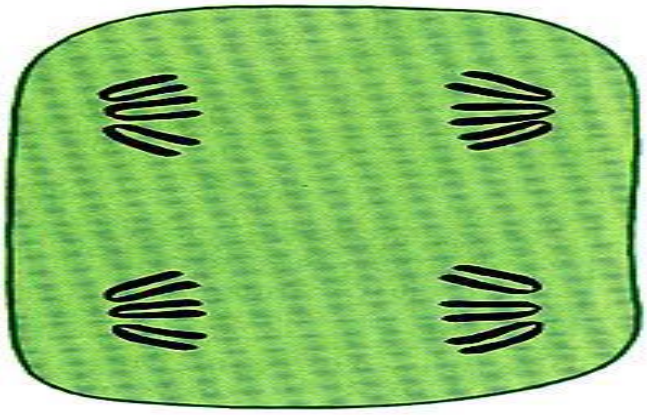
تظهر النّويّات من قُطبيّ الخليّة. ينقسم السّيتوبلازم، وتنتج خليتان من كل خلية دخلت في المرحلة الثّانيّة من الانقسام الاختزالي، وبذلك يكون النّاتج النّهائي للانقسام الاختزالي أربع خلايا وليدة، وفي كل خلية نصف عدد كروموسومات الخليّة الأصليّة.



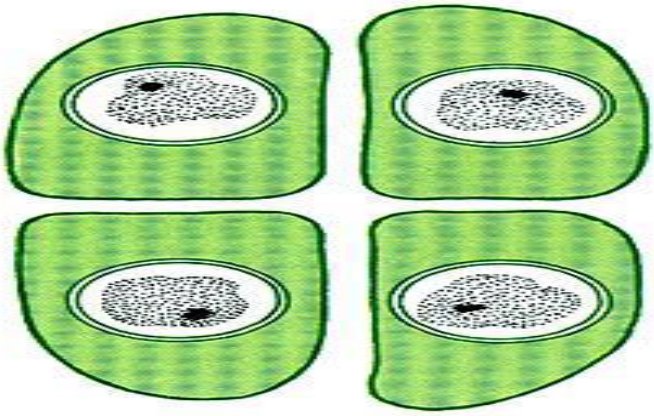
Metaphase II



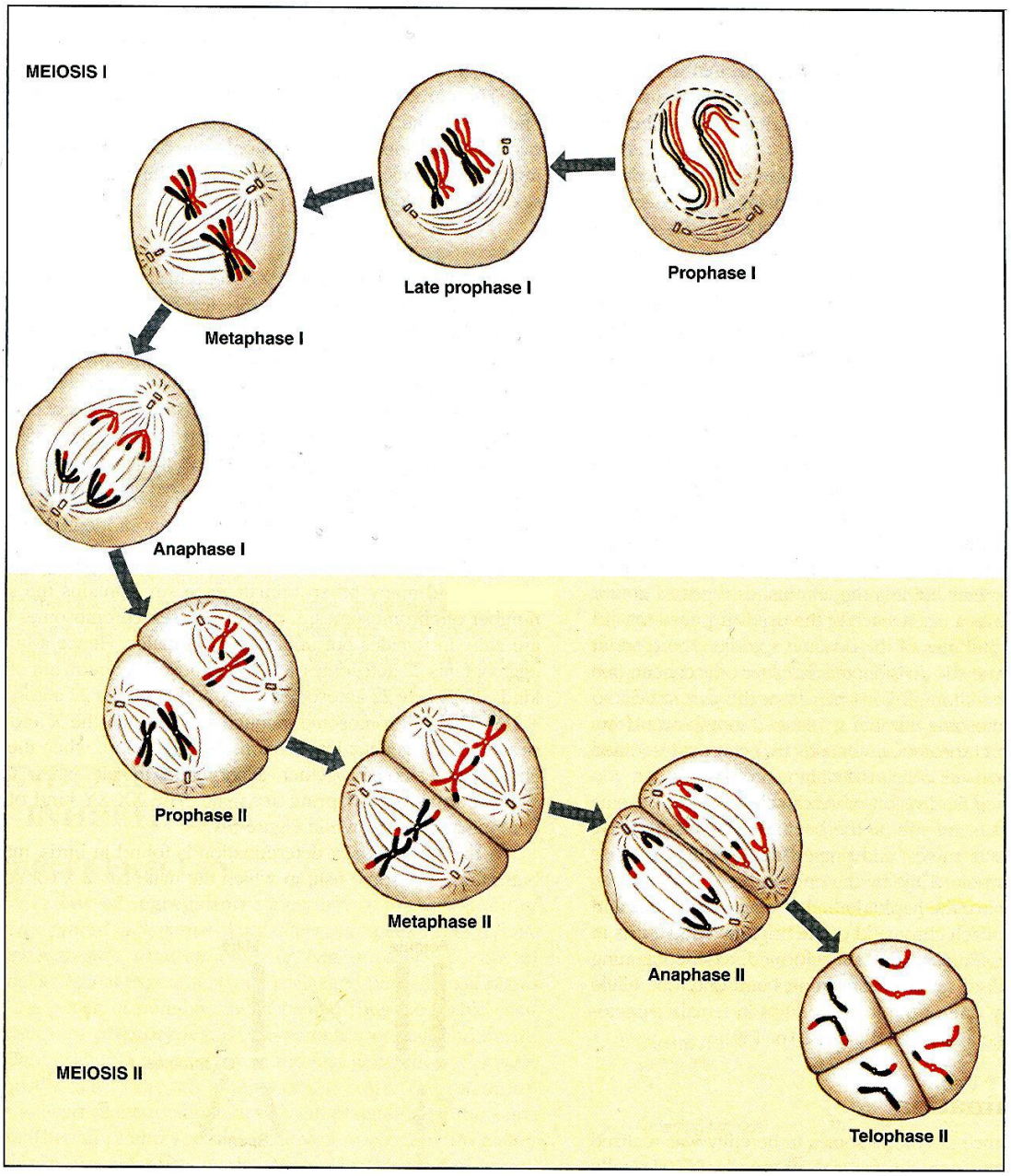
Anaphase II



Telophase II



Four haploid cells



انقسام السّيتوبلازم في الخلايا النباتيّة والحيوانيّة:

تختلف آليّة انقسام السّيتوبلازم أثناء الطّور النّهائي من الانقسام الاختزالي في كل من الخلايا النّباتيّة والحيوانيّة، يحدث انقسام السّيتوبلازم في الخلايا الحيوانيّة بمساعدة الألياف المغزليّة :

(Spindle Apparatus)التي تُحدّد موقع الحلقة المُتقلّصة (Contractile Ring)في الخليّة. تتكوّن الحلقة المتقلصّة من خيوط الأكتين (نوع من الخيوط الدّقيقة التي توجد فقط في الخلايا الحيوانيّة)، وبروتين الميوسين، وعند انقسام السّيتوبلازم يُسبّب بروتين الميوسين انقباض خيوط الأكتين؛ الأمر الذي يؤدي إلى تكوّن أخدود عميق في وسط الخليّة يُسمّى أخدود الانقسام : (Cleavage Furrow)، ومع استمرار انقباض خيوط الأكتين ينقسم السّيتوبلازم إلى خليتَين وليدتَين.

يحدث انقسام السّيتوبلازم في الخلايا النّباتيّة بطريقة مختلفة، فلا يتكوّن أخدود الانقسام، في المقابل تتكوّن صفيحة خلويّة (cell plate) :في منتصف الخليّة النباتيّة، وتبدأ بالتّمدد أفقياً حتى تلتحم بالجدار الخلوي وتُشكّل بذلك فاصلاً بين الخليتَين الوليدتَين، في ما بعد تتحوّل الصّفيحة الخلويّة إلى جدار خلوي، وهنا لا بُدّ من التّنويه إلى أنّ الصّفيحة الخلويّة تنشأ من حويصلات يُنتِجها جهاز غولجي (Golgi apparatus).

يتبين مما سبق أن الانقسام المنصف يتضمن انقسامين متتاليين لاتتضاعف خلالهما الـ DNA والخيوط الصبغية إلا مرة واحدة. ينتج عن الانقسام الأول تكوين خليتين تحتوي كل منهما

على نصف العدد من الصبغيات(N) ولكن كل صبغي يتكون من صبيغيين (2N). وفي الانقسام الثاني ينفصل صبيغيا كل صبغي عن بعضهما ليتكون في النهاية أربع خلايا أحادية الصيغة الصبغية (N) انطلاقاً من خلية أم ثنائية الصيغة الصبغية. وتعطي هذه الخلايا نطاف في الذكور وبويضات في الإناث. وأثناء عملية الالقاح تتحد نواة النطفة مع نواة البويضة لتتكون البيضة المخصبة التي تحتوي على العدد المضاعف من الصبغيات (2N). وهنا تظهر أهمية الانقسام المنصف، فلولا حدوثه لتضاعف عدد الصبغيات عند كل مرة تحدث فيها عملية الالقاح.

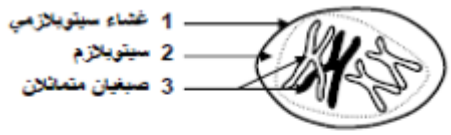
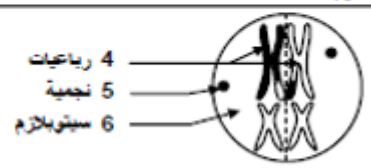
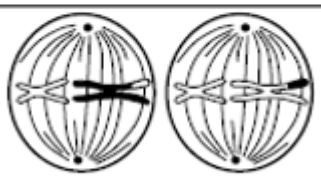
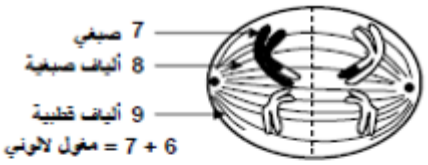
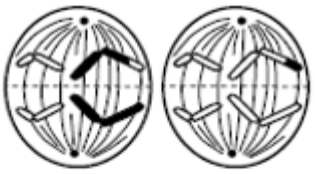
أهمية الانقسام المنصف:

1. يتكون الناتج النهائي من أربعة خلايا بكل منها نصف العدد الوراثي يطلق عليها إسم أعراس (حيوانات منوية ، بويضات) . إذا اتحد العروس الذكري مع العروس الأنثوي ينتج الزيجوت الذي يحتوي العدد الأصلي من الصفات الوراثية والذي ينتج منه الجنين بذلك يحفظ العدد الثابت للكروموسومات.

2- تبادل صفات وراثية بين الكروموسومات بنظام ثابت وذلك في المرحلة الضامة من الطور التمهيدي الأول بحيث تنتقل صفة مكان صفة أخري مثلها وتسمى هذه العملية بالعبور .

3- ظهور صفات سائدة وصفات متنحية .

4-فصل الصبغي X عن الصبغي Y في عروسين منفصلين عند النطاف، ولا يعودان للاجتماع معاً ثانية إلا بعد الإلقاح في البيضة المخصبة.

I = الانقسام الأول = الانقسام المنصف	II = الانقسام الثاني = الانقسام التعادلي
 **① الطور التمهيدي I** يتميز بتكثيف الصبغيات، وباقتران الصبغيات المتماثلة ، مشكلة أزواجا تسمى الرباعيات. اختفاء الغشاء النووي والنويات	 **⑤ الطور التمهيدي II** تبتدئ مباشرة بعد الطور النهائي I في كل خلية، تبقى الصبغيات منتظرة طوليا، و يظهر المغزل الانلوني في كل خلية.
 **② الطور الاستوائي I** تتموضع الصبغيات المتماثلة في المستوى الاستوائي للخلية، تتكون النجميتين ويبدأ تشكل المغزل الانلوني.	 **⑥ الطور الاستوائي II** بعد اكتمال تشكل المغزل الانلوني، تتموضع الصبغيات على مستوى وسط الخلية مشكلة صفيحة استوائية.
 **③ الطور الانفصالي I** انفصال الصبغيات المتماثلة بعضها عن بعض، وهجرتها نحو القطب الخلوي القريب منها، كل صبغي مكون من صبيغيين.	 **⑦ الطور الانفصالي II** انشطار الجزيء المركزي لكل صبغي بفعل تقلص خيوط المغزل الانلوني، فنحصل على صبغيات مشكلة من صبيغي واحد، تهاجر في اتجاه قطبي الخلية.
 ④ الطور النهائي I تجمع الصبغيات المكنة من صبيغيين في كل قطب، ونحصل على خليتين بنتين أحاديتا الصبغية الصبغية.	 **⑧ الطور النهائي II** تنقسم كل خلية مشكلة خليتين، وبذلك نحصل على أربع خلايا أحادية الصبغية الصبغية.