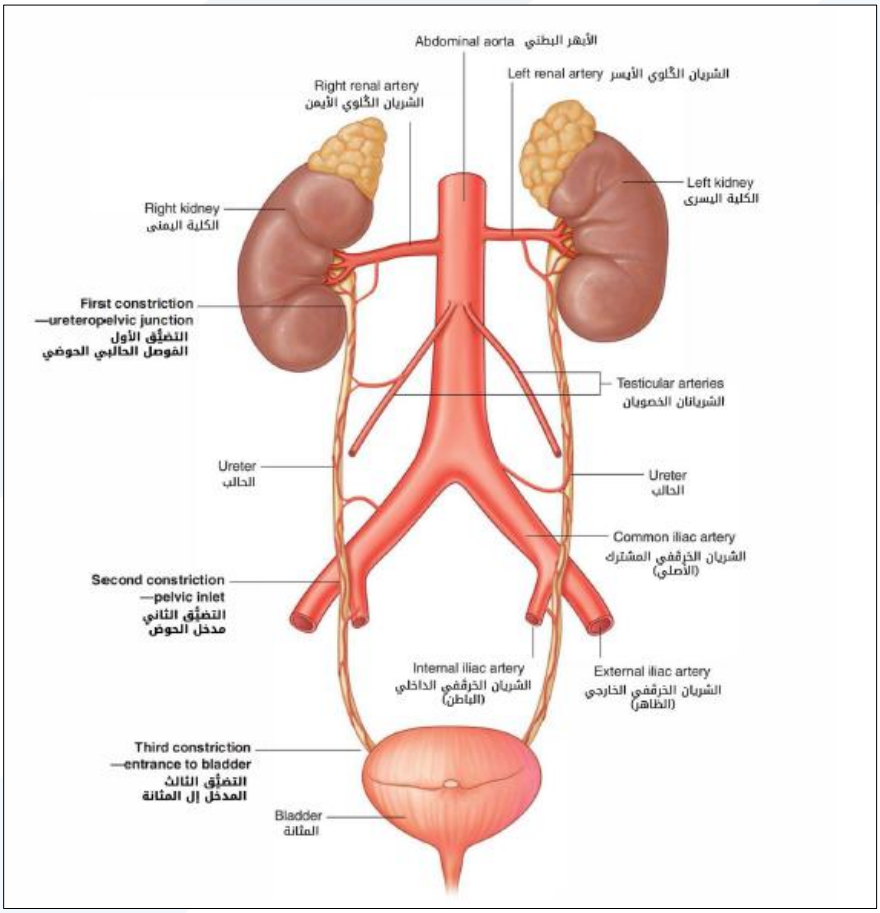
المحاضرة السادسة

الجهاز البولي

يتألف الجهاز البولي إجمالاً من كليتين، وحالبين، ومثانة بولية، وإحليل تحيط به مصرتان (معصرتان) بوليتان داخلية وخارجية، الشكل (1). ويصح القول إن الكلية هي عضو الإطراح الرئيس في جسم الإنسان مع أنها ليست العضو الوحيد، فالجسم يطرح الماء والأملاح المعدنية وبعض المواد العضوية عبر غدده العرقية، ويطرح الكبد العصارة الصفراوية إلى الوسط الخارجي مروراً بالاثني عشري، كما أن جهاز التنفس يخلص الجسم من غاز ثنائي أكسيد الكربون.



الشكل (1): مكونات الجهاز البولي.

تصفي الكلية الدم، وتشكل رشاحة تحتوي على جميع مكونات البلازما الدقيقة التي تستطيع عبور غشاء الترشيح، وفي أثناء انتقال الرشاحة عبر أقسام النفرون الكلوي تضاف إليها بعض المواد بالإفراز Secretion بينما تتعرض مكوناتها لإعادة امتصاص، ويقل حجم الرشاحة تدريجياً إلى أن تتحول إلى بول، ويكون حجم البول متغيراً بما يلبي متطلبات الاستتباب المائي والشاردي والحلولي للجسم عامة، ومرتبطاً بآليات تنظيم عديدة تصون هذا الاستتباب.

وظائف الكلية

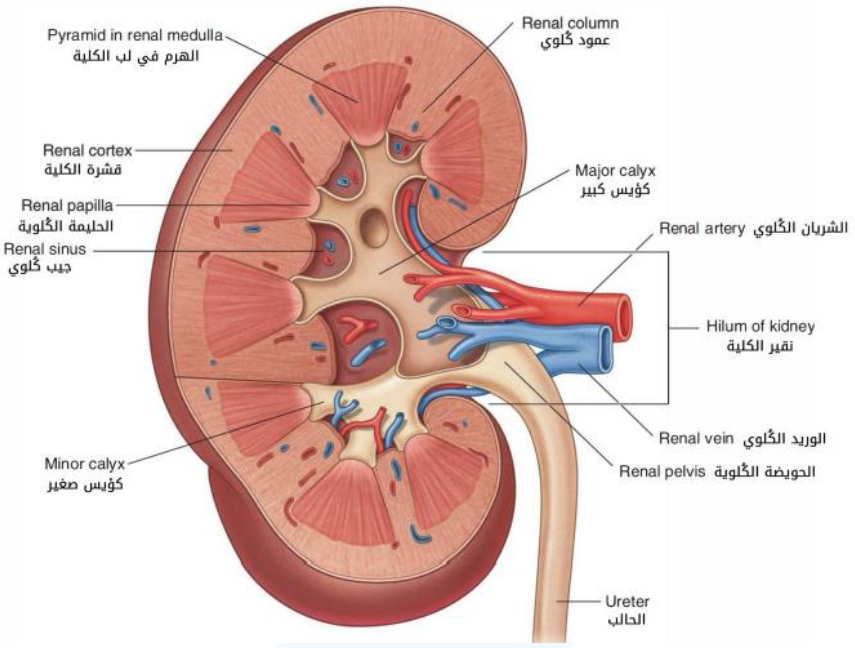
1. تؤدي الكلية دوراً أساسياً في التوازن المائي للجسم، فهي تحافظ على حجوم سوائله (السائل الخلالي ومصورة الدم وغيرهما) من خلال طرحها الماء أو احتباسه داخل الجسم.
2. تصون التوازن الشاردي والحلولي لسوائل الجسم، وذلك من خلال زيادة أو إنقاص طرحها للشوارد (الصوديوم، والبوتاسيوم، والكلور ... الخ) عند انحراف تراكيزها عن معدلاتها السوية في هذه السوائل. وفي السياق نفسه، تسهم الكلية في صون الضغط الحلولي لسوائل الجسم الذي يتعلق بشكل أساسي بمقدار ما تحتويه هذه السوائل من شوارد معدنية وبروتينات وماء.
3. تخلص الجسم من فضلات الاستقلاب الضارة، وذلك من خلال طرحها في البول، فالبولة الناتجة عن استقلاب البروتينات مثلاً هي مادة سامة للجسم عندما يتجاوز تركيزها حداً معيناً، وينطبق الأمر نفسه على حمض البول الناتج عن استقلاب الكرياتين العضلي، ونواتج استقلاب الهيموغلوبين، والعديد من فضلات الاستقلاب الأخرى.
4. تطرح عدداً كبيراً من المواد الكيميائية، كالأدوية والمبيدات ومستقلباتها.
5. تسهم بتوطيد التوازن الحمضي القلوي لأخلاط الجسم، وتقدر قيمة الـ pH، لهذه الأخلاط في الحالة السوية بـ 7.4، ويعد ثبات هذه القيمة شرطاً أساسياً لبقاء العضوية على قيد الحياة، فإذا ما تجاوزت درجة الحموضة (الباءهاء) مجال التغيرات (7.8 – 7.0) أي بمقدار 0.4 زيادة أو نقصان عن الحد الطبيعي ((بعض المراجع تحدد المجال (8.0-7.9 – 6.9) أي التغير بمقدار 0.5))، تتمسخ البروتينات الجسم، وتضطرب نفوذية أغشية الخلايا وانتشار الشوارد عبرها، وتغير هذه الظروف أيضاً بنية الإنزيمات، ومن ثم تحدث اضطرابات استقلابية خطيرة.

كذلك تمتلك الكلية بالإضافة إلى وظائفها الاطراحيه الأساسية **وظائف أخرى** يمكن إجمالها بالآتي:

1. استحداث السكر Neoglucogenese، فهي تصنع الغلوكوز من مواد غير سكرية (كالحموض الأمينية وغيرها)، وتفرزه إلى الدم.
2. صناعة هرمون الإريثروبيوتين Erythropoietin الذي يحفز إنتاج كريات دم حمراء جديدة من خلال زيادته انقسام الخلايا المولدة لها في نقي العظم، وزيادة تركيز الهيموغلوبين داخل الكريات.
3. صناعة الرينين الذي يتواسط تحول مولد الأنجيوتنسين إلى الأنجيوتنسين I الذي يقلب في الرئتين بوساطة إنزيم محوّل إلى الأنجيوتنسين II، ويؤدي هذا الناتج الأخير دوراً مهماً في المحافظة على ضغط الدم واستتباب تركيز الصوديوم والبوتاسيوم في سوائل الجسم.
4. تحول 1- هيدروكسي كولي كالسيفرول إلى 1- 25 داي هيدروكسي كولي كالسيفرول (الشكل الفعال لفيتامين د) بتواسطها إضافة جذر هيدروكسيل ثانٍ إليه، ومن المعلوم أن فيتامين د له دور أساسي بالمحافظة على توازن كالسيوم الدم.

بنية الكلية

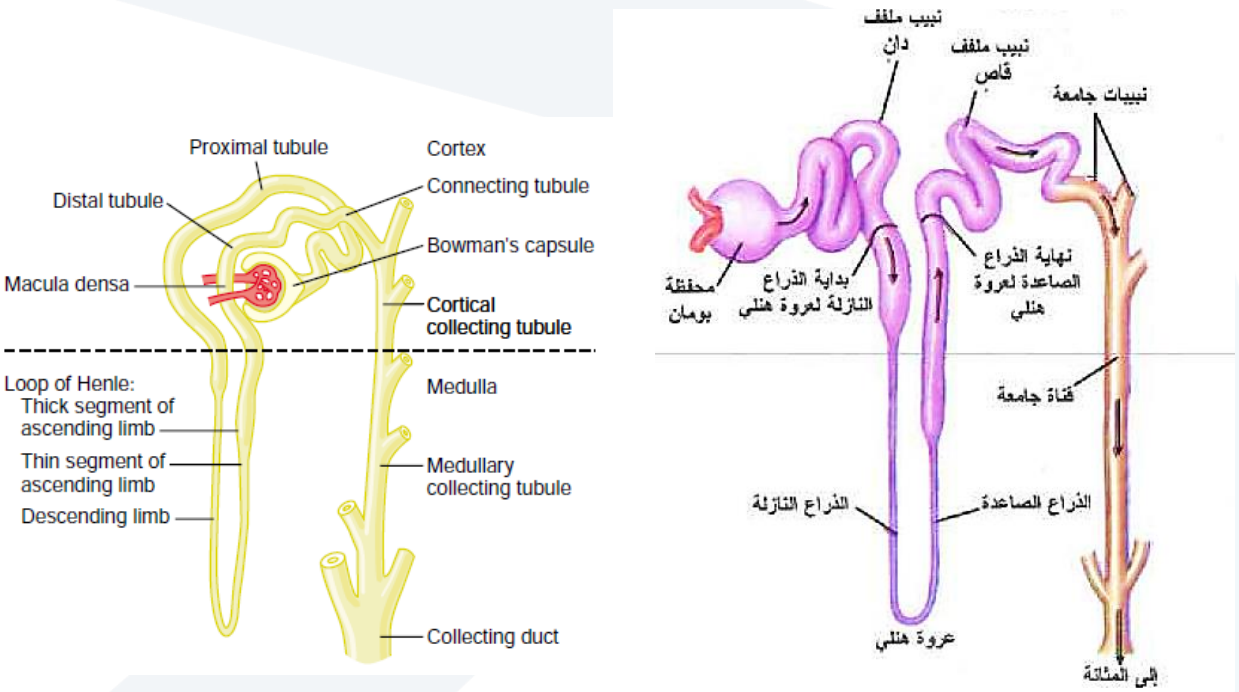
يوضح الشكل (2) بنية الكلية؛ حيث يبدو فيه بوضوح القشرة الكلوية واللب والأهرامات والكؤيسات الكلوية. وتعد النفرونات أو الكليونات أو الأنابيب البولية الوحدات الوظيفية في الكلية، إذ يبلغ عددها في كل كلية نحو مليون كليون.



الشكل (2): بنية الكلية.

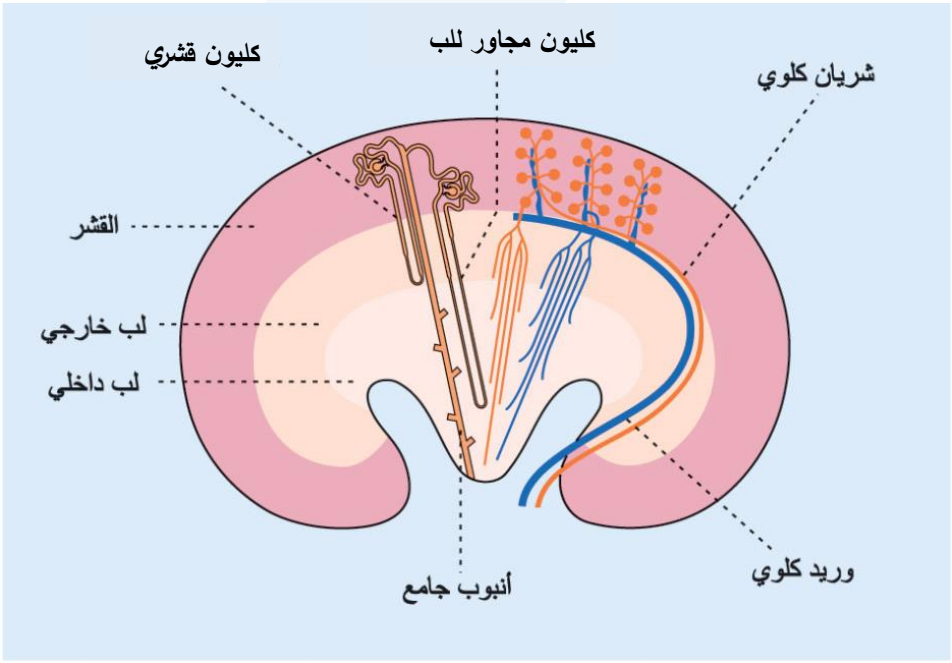
يتألف الكليون (النفرون) الشكل (3) من:

1. **الكبيبة** وهي لمة من شعيرات دموية تغطيها محفظة من نسيج ليفي يدعى **محفظة بومان Bowman's capsule** تتلقى الشعيرات الدموية الكبيبية إمدادها الدموي من شريان وارد بينما يغادرها الدم عبر شريان صادر.
2. **النبيب المتعرج (الملفف) القريب (الداني) Proximal tubule:** يقدّر طول الواحد منها بـ 15 ملليمتراً وقطره بـ 5 ميكرومتر.
3. **عروة هانله (هنلي) Loop of Henle:** تتكون من ذراع نازلة يتراوح طولها بين 2 – 14 ملليمتراً، وقطرها نحو 15 ميكرومتر، أما الذراع الصاعدة فيقدّر طولها بنحو 12 ملليمتراً، ويكون القسم القاصي من هذه الذراع أشد ثخناً من بقية مناطقها الأخرى، ولاسيّما في منطقة اتصالها مع النبيب المتعرج (الملفف) القاصي.
4. **النبيب المتعرج البعيد (القاصي) Distal tubule:** ويقدر طول الواحد منها بـ 5 ميليمترات.
5. **القناة الجامعة Collecting duct:** يبلغ طول القناة منها نحو 20 ميليمتراً، وتنفتح القنوات الجامعة على حوض (حويضة) الكلية.



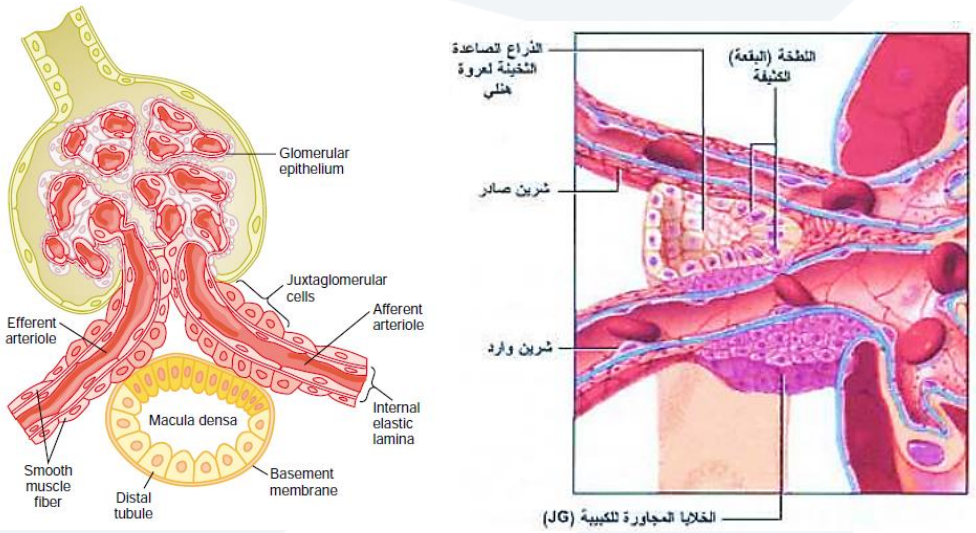
الشكل (3): أقسام النفرون.

يمتلك الإنسان نحو 15 % من مجموع الكليونات تكون ذات عرى طويلة تهبط حتى مستوى الأهرامات الكلوية، وتعرف هذه الكليونات عادة باسم الكليونات المجاورة للب، وهي تلعب دوراً رئيساً في تركيز البول، أما ما تبقى من كليونات (الـ 85 % الباقية)، فإنها تعرف باسم الكليونات القشرية، الشكل (4).



الشكل (4): كليون قشري وآخر مجاور للب

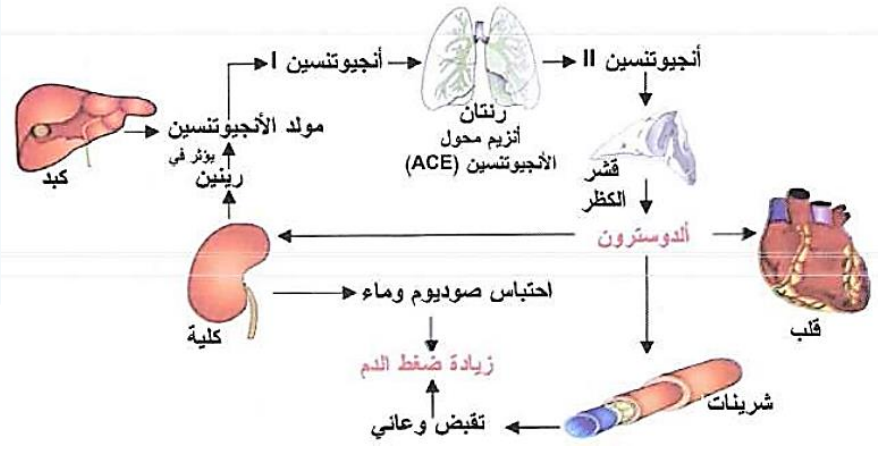
تمر الذراع الصاعدة بالقرب من الشريان الوارد إلى كبيبة الكليون ويشكلان معاً ما يعرف بالجهاز المجاور للكبيبة الشكل (5)، الذي يؤدي دوراً حاسماً في تنظيم فعالية منظومة الرينين – الأنجيوتنسين – الألدوستيرون.



الشكل (5): الجهاز المجاور للكبيبة.

تفرز الخلايا المجاورة للكبيبة هرمون الرينين عند استجابتها لمنبهات متنوعة كالإقفار الكلوي الذي يحدث عند نقص حجم الدم، وانخفاض حجم السائل خارج الخلايا، ونقص محتوى المصورة الدموية من أيونات الصوديوم، وارتفاع تركيز أيونات البوتاسيوم في بلازما الدم، وغيرها من العوامل الأخرى.

يقوم هذا الهرمون بشطر ببتيد عشاري بلازمي يدعى الأنجيوتنسين I من بروتين بلازمي يسمى مولد الأنجيوتنسين. ويفقد الأنجيوتنسين I حمضين أمينيين بفعل أنزيم محوّل له فينقلب في الرئتين إلى ببتيد ثماني يدعى الأنجيوتنسين II، ويعرف الأنجيوتنسين II بخواصه القوية المقبضة للأوعية الدموية، فضلاً عن تحريضه إفراز الألدوستيرون من قشر الكظر، كما يسهم في تنظيم شرب الماء وذلك من خلال تأثيره المباشر في الوطاء وإطلاقه الإحساس بالعطش.الشكل (6).



الشكل (6): آلية عمل الرينين.

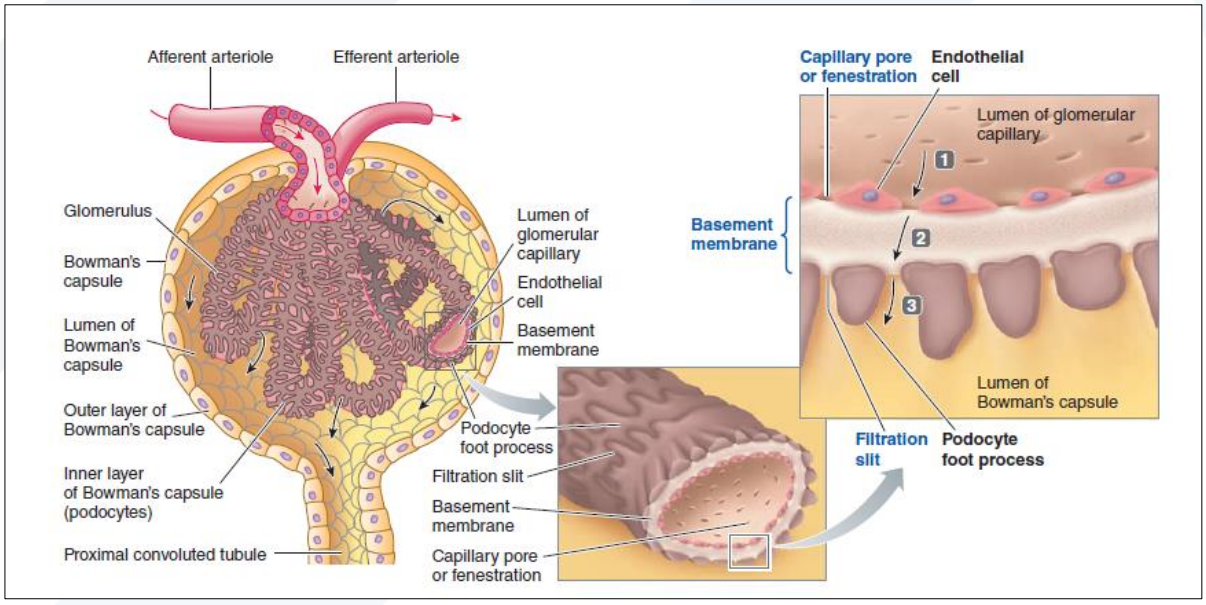
عمل الأنبوب البولي (الكليون) أو النفرون

أولاً: الترشيح الكبيبي

هو حدث فيزيائي منفعل لا يتطلب حدوثه صرفاً للطاقة. تمتاز الشعيرات الدموية المؤلفة للكبيبة بنفوذيتها المرتفعة التي تفوق بنحو 50 مرة نفوذية الشعيرات الدموية في العضلات الهيكلية.

تتألف الكرية الكلوية من أنبوب مغلق النهاية ينخمص ليشكل محفظة ذات جدار ظهاري مضاعف تدعى محفظة بومان Bowman's capsule، وتحيط هذه المحفظة بالكبيبة Glomerulus التي تتألف من شبكة معقدة مكونة من حوالي 50 شعيرية دموية تنشأ من شُرين واحد وارد، تعود لتتصل ببعضها البعض ليتشكل شُرين صادر، الشكل (7).

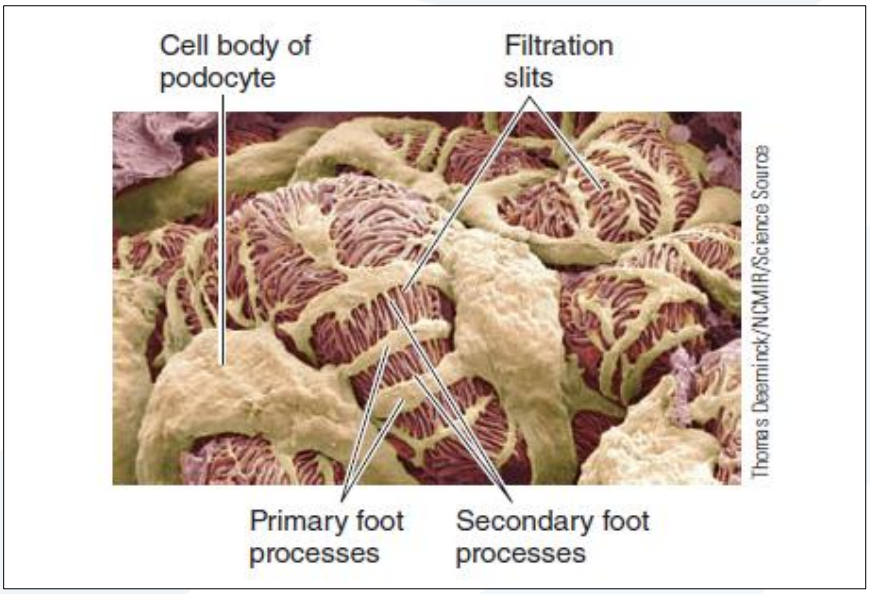
بنية المحفظة الكلوية بكاملها لها علاقة بعملها في ترشيح الدم؛ إذ تتألف جدران شعيراتها من طبقة واحدة من الخلايا البطانية الظهارية التي تتخللها ثقوب أو مسامات أقطارها بين 50 – 100 نانومتر، تتوضع هذه الخلايا على غشاء قاعدي (صفيحة Lamina قاعدية) يحيط تماماً بكل شعيرة، وهي البنية الوحيدة المستمرة التي تفصل الدم عن لمعة Lumen محفظة بومان.



الشكل (7): الكبيبات الكلوية، وطبقات غشاء الترشيح الكبيبي.

تتألف الطبقة الداخلية (الحشوية) من محفظة بومان من خلايا تسمى الخلايا القدمية (أو الخلايا الرجلاء) Podocytes لها أذرعاً أو نتوءات أولية Primary processes تعطي بنى تشبه الأرجل الأنبوبية تسمى النتوءات الثانوية Secondary processes أو النتوءات القدمية (أو الاستطالات القدمية) الشكل (8)، تدعم هذه النتوءات القدمية الغشاء القاعدي والشعيرية التي تقع تحتها، هناك ثقوب أو فتحات بين النتوءات القدمية قطرها 25 نانومتر تسمى

الشقوق الترشيحية Filtration slits أو الثقوب الشقية Slit pores، (أو فلعات ترشيح) تسهل عملية الترشيح. أما الخلايا الخارجية من محفظة بومان فهي خلايا ظهارية رصفية (حرشفية) غير متخصصة بعملية الترشيح.



الشكل (8): خلايا محفظة بومان القدمية (الخلايا الرجلاء)، والشقوق الترشيحية.

الترشيح الفائق Ultrafiltration هو تخليص الدم من كافة المواد صغيرة الحجم ذات الكتلة الجزيئية RFM الأقل من 60000 دالتون وقطر لا يتعدى 8 نانومتر (لذلك سمّي بالفائق لأنه لا يسمح لبروتينات البلازما الكبيرة وخلايا الدم بالخروج)، وتشكيل سائل مائع يدعى الرشاحة الكبيبية Glomerular filtrate.

تمر المواد التي تجبر على الخروج من الشعريات الكبيبية عبر:

أ- **المسامات أو الثقوب الشعرية** Capillary pore or fenestration بين الخلايا البطانية Endothelial cell.

ب- **الغشاء القاعدي** Basement membrane.

ج- **الشقوق الترشيحية** Filtration slits (أو الثقوب الشقية) بين النتوءات الثانوية (القدمية) للخلايا القدمية.

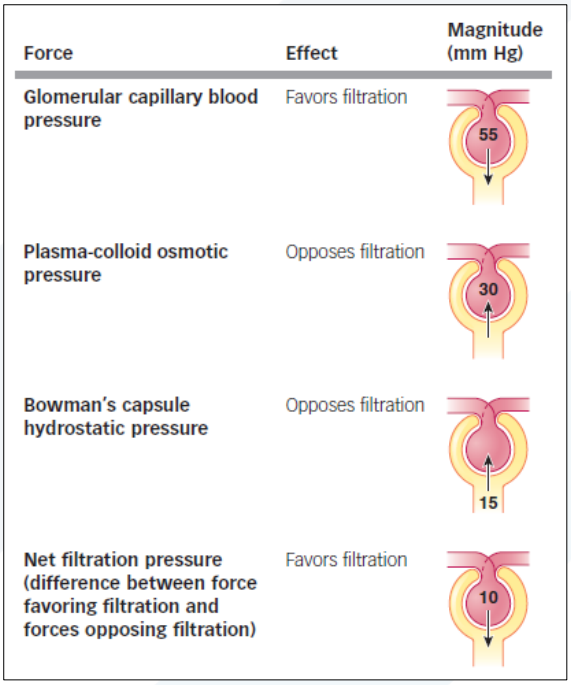
يسمى الضغط **الفعّال** الذي يجبر السائل على الخروج من الكبيبة الشعيرية **بضغط الارتشاح (الترشيح) الصافي Net filtration pressure** وهو ينتج من توازن ضغوط أخرى، الشكل (9):

- **الضغط الشرياني (الضغط الهيدروستاتيكي أو الضغط المائي السكوني) داخل الشعيرات الكبيبية:** يبلغ 55 ملم زئبقي، ويكون باتجاه لمعة أو حيز بومان.
- **الضغط التناضحي الغرواني لبروتينات البلاسما:** يبلغ 30 ملم زئبقي، ويكون معاكس للضغط المائي السكوني للشعيرات الكبيبية، ويسعى لحبس السائل ضمن الشعيرات.
- **ضغط محفظة بومان:** ويبلغ 15 ملم زئبقي، ويكون أيضاً ضغط معاكس لأن المحفظة تقيّد حجم الكبيبة.

يحسب ضغط الترشيح الصافي من القانون الآتي:

ضغط الترشح الصافي = الضغط الشرياني داخل الشعيرات - (ضغط المحفظة + الضغط التناضحي).

= 55 – (30 + 15) = 10 ملم زئبقي



الشكل (9): الضغوط المؤثرة في الرشح الكبيبي.

يشبه التركيب الكيميائي للرشاحة الكبيبية تركيب بلازما الدم، فهي تحتوي على الغلوكوز والحموض الأمينية، والفيتامينات، وبعض الهرمونات، والبولة، وحمض البول، الشوارد، والماء. أما كريات الدم البيضاء والحمراء والصفيحات الدموية، فتمنعها المسامات أو الثقوب الشعيرية من الخروج من الشعيرات الكبيبية، كذلك الأمر بالنسبة إلى بروتينات البلازما الكبيرة كالألبومين والغلوبولين، فلا يسمح لها الغشاء القاعدي بالخروج أيضاً وهو بذلك يلعب دور المصفاة.

تتلقى الكلية ما مجموعه 1200 - 1300 مل من الدم في الدقيقة (يمثّل الجريان الدموي الكلوي)، وهذا يعني أن الدم ككل (الدم ضمن جهاز الدوران) يمر عبر الكلية كل 4 – 5 دقائق. ويحوي هذا الحجم 700 مل من البلازما (يمثّل الجريان البلازمي الحقيقي) يرشح منه إلى الكبيبة الكلوية 125 مل في الدقيقة (يمثّل معدل الترشيح الكبيبي GFR السوي) وهذا يعادل 7500 مل أي 7.5 ل في الساعة، و180 ل في اليوم الواحد. بيد أن الإنسان بحالته السوية (الطبيعية) لا يتخلص يومياً إلا من 1 - 2 ل من البول، ويفسّر ذلك بإعادة امتصاص 98% من الماء المرتشح من خلال النبيبات الكلوية.

نبيبات الكلية وإعادة الامتصاص والافراز

إن الترشيح الفائق عملية تلقائية تماماً وغير مميزة (من حيث المواد الضرورية) فالمواد المفيدة والحيوية تزال من البلازما مع مواد الإطراح والفضلات الأخرى. وتقوم نبيبات الكلية بإعادة الامتصاص الانتقائي للمواد المفيدة واللازمة لجعل تركيب سوائل الجسم بحالة مستقرة. كما يمكن دخول عدد من الفضلات الأخرى للنبيبات بالإفراز الفعّال من الشعيرات الدموية المحيطة بها.

ينقل النبيب المتعرج القريب Proximal convoluted tubule الرشاحة من محفظة بومان إلى عروة هانله، وهو يتألف من طبقة واحدة من الخلايا الظهارية ذات الخملات الدقيقة (طول الواحدة ا ميكرومتر) وتكون بشكل حافة فرشاة (فرجونية) على سطح بطانة النبيب، ويرتكز الغشاء الخارجي للخلية الظهارية على غشاء قاعدي، وينخمص ليشكل تيه القنوات القاعدية، ويفصل الأغشية المتجاورة لخلايا النبيب بعضها عن بعض فراغات بين خلوية، ويتجول السائل (قوامه مائع) في القنوات القاعدية وفي الفراغات بين الخلايا كما يظهر في الشكل (10). ويمكن القول بأن خلايا النبيب المتعرج القريب والشبكة التي تحيط بالشعيرات حول النبيب تسبح في هذا السائل الذي يصلها ببعضها البعض.

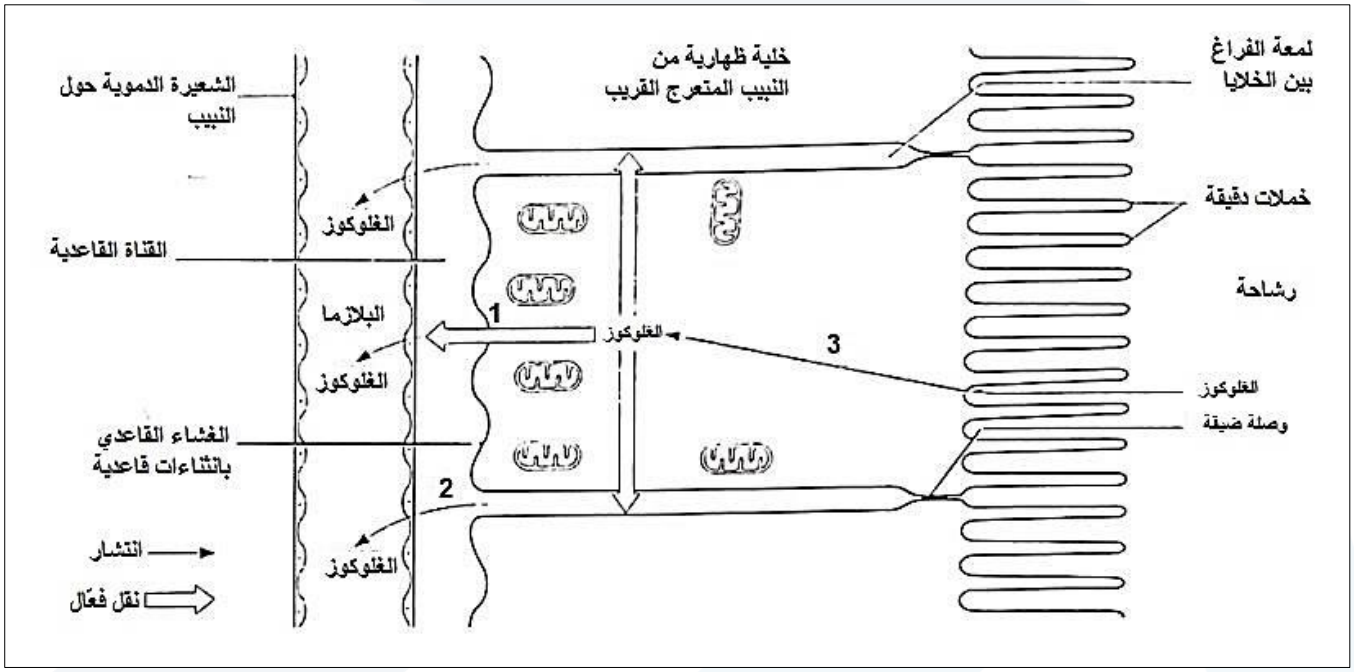
توجد في خلايا النبيب المتعرج القريب عدد كبير من المتقدرات الحيوية (الجسيمات الكوندرية) التي تتركز قرب الغشاء القاعدي حيث تقدم الـ ATP للبروتينات الحاملة المرتبطة بالغشاء التي تقوم بالنقل الفعّال.

إعادة الامتصاص الانتقائي Selective reabsorption

تعد المساحة الكبيرة لخلايا النبيب المتعرج القريب، والمتقدرات الكثيرة فيها، وقرب الشعيرات الدموية حول النبيب، تكيفات من أجل إعادة امتصاص المواد من الرشاحة الكبيبية؛ إذ يعاد هنا امتصاص أكثر من 80% من هذه الرشاحة، التي تشمل جميع جزيئات الغلوكوز والحموض الأمينية والفيتامينات والهرمونات، و85% من كلور الصوديوم والماء.

وتحدث إعادة الامتصاص كالآتي، الشكل (10):

1. ينقل الغلوكوز والحموض الأمينية والأيونات التي انتشرت إلى داخل خلايا النبيب المتعرج القريب من الرشاحة، بفعالية إلى خارج الخلايا لتخل الفراغات بين الخلايا والقنوات القاعدية بوساطة بروتينات حاملة في أغشية الخلايا.
2. ما إن تصبح المواد في هذه الفراغات والقنوات حتى تدخل الشعيرات حول النبيبات الشديدة النفاذية وذلك بالانتشار، وتحمل بعيداً عن النفرون (الكليون).
3. ينجم عن التخلص المستمر من هذه المواد من خلايا النبيب المتعرج القريب تدرج انتشار بين الرشاحة في اللمعة والخلايا، تمر وفقه نزولاً مواد أخرى. وعندما تصبح داخل الخلايا تنقل بفعالية إلى داخل الفراغات والقنوات، وتستمر الدورة.



الشكل (10): آلية اعادة امتصاص مذابات الرشاحة الكبيبية.

يخفض أخذ الصوديوم وما يرافقه من أيونات، كمون المذابات في رشاحة النبيب، وتمر كمية مكافئة من الماء إلى داخل الشعيرات حول النبيب بالتناضح (الحلول أو الأسموزية). وتزال مظم المذابات والماء المرتشح من الرشاحة بمعدل ثابت تقريباً، وهذا يؤدي إلى تكوين رشاحة في النبيب متساوية التناضح مع بلازما الدم في الشعيرات الدموية حول النبيب.

يعاد امتصاص 50% من البولة من الرشاحة بالانتشار، وتدخل الشعيرات حول النبيب وتعود إلى الدوران، بينما يطرح الباقي مع البول.

أما البروتينات صغيرة الكتلة الجزيئية، أي التي تقل عن 68000 دالتون، والتي تدخل النبيب أثناء الترشيح الفائق. فتزال بالاحتساء Piniocytosis لدى قاعدة الخملات الدقيقة، وتحاط هذه البروتينات بحويصلات احتسائية تتصل بها جسيمات حالّة Lysosomes؛ إذ تقوم الأنزيمات المحلمهة الموجودة داخل الجسيمات الحالّة بهضم البروتينات وتحويلها إلى حموض أمينية، إما تستخدم من قبل خلايا النبيب أو تنقل بالانتشار إلى الشعيرات الدموية حول النبيب.

وأخيراً يحدث في هذه المنطقة إفراز فعال للكرياتينين وينقل من السائل الخلالي الذي تسبح فيه النبيبات إلى رشاحة النبيب، وتطرح في النهاية في البول.

تشكيل البول

يتشكل البول بتبادل المذابات والماء بين الرشاحة التي تغادر النبيب المتر القريب وكافة الأقسام الأخرى البعيدة عنه، الجدول (1) الذي يظهر تكوين المصورة (البلاسما) والبول، والتغيرات في التراكيز أثناء تشكيل البول.

الجدول (1): الفرق بين تركيب البلاسما والبول.

	بلاسما %	بول %	الزيادة
الماء	90	95	-
البروتين	8	0	-
الغلوكوز	0.1	0	-
البولة	0.03	2	67×
حمض البول	0.004	0.05	12×
الكرياتينين	0.001	0.075	75×
Na^+	0.32	0.35	1×
NH_4^+	0.0001	0.04	400×
K^+	0.02	0.15	7×
Mg^{2+}	0.0025	0.01	4×
Cl^-	0.37	0.60	2×
PO_4^{3-}	0.009	0.27	30×
SO_4^{2-}	0.002	0.18	90×

الشعبتان النازلة والصاعدة من عروة هانله

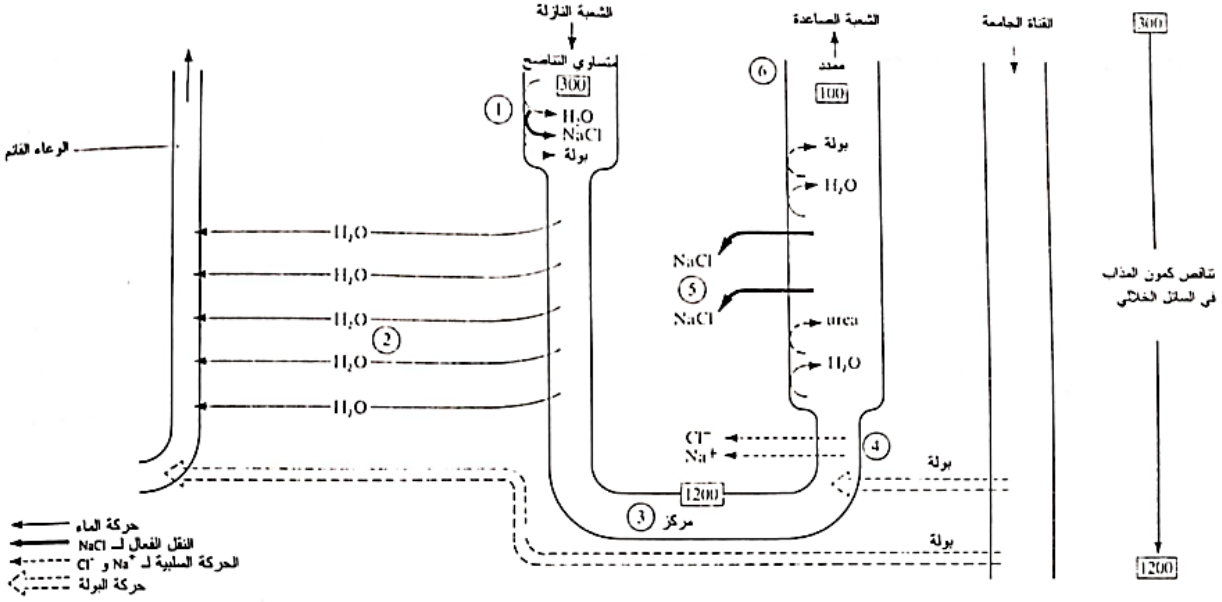
تخلق عروة هانله، مع ما يرافقها من شعيرات دموية في الوعاء القائم والقناة الجامعة، تدرجاً تناضحياً متزايداً في اللب من القشرة باتجاه الحليمة وتحافظ عليه، بسبب تراكم التراكيز المتزايدة لكلور الصوديوم والبولة. وهذا بدوره يوفر الظروف لإزالة الماء تدريجياً بالتناضح من النبيب ونقله إلى داخل المنطقة الخلالية للب. ثم يزال الماء الذي أعيد امتصاصه من اللب بالأوعية الدموية للوعاء القائم. وينتج عن ذلك بول أكثر تركيزاً في القناة الجامعة.

حركة الأيونات والبولة والماء بين عروة هانله والوعاء القائم والقناة الجامعة

يظهر الشكل (11) النقاط الآتية:

1. الجزء الأول من العروة قصير وعريض نسبياً وغير نفوذ للأيونات والبولة والماء، وينقل الرشاحة إلى الجزء التالي الرفيع والطويل وهو نفوذ للماء تماماً.
2. بما أن المنطقة الخلالية للب أكثر تركيزاً بسبب التراكيز العالية لكلور الصوديوم والبولة، فإن الماء يسحب من الرشاحة بالتناضح (الحلول أو الاسموزية) وينقل بعيداً بوساطة الوعاء القائم.
3. هذا يقلل من حجم الرشاحة بنسبة 5% ويجعلها أكثر تركيزاً. الشعبة الصاعدة من عروة هانله غير نفوذة للماء في كامل طولها.

4. الجزء الأول من الشعبة الصاعدة (الرفيعة) نفوذ لكلور الصوديوم والبولة، لذلك ينتشر الصوديوم للخارج ويتجه للقشرة، بينما تنشر البولة إلى داخل اللب.
5. الجزء الصاعد الثخين من العروة يحدث فيه نقل فعال لأيونات الصوديوم والكلور إلى خارج الرشاحة.
6. يزيد فقدان أيونات الصوديوم والكلور (من الرشاحة) تركيز المنطقة اللبية وتسير الرشاحة إلى النبيب المتعرج البعيد.



الشكل (11): حركة الأيونات والماء والبولة في اللب.

النبيب المتعرج البعيد

يتولى عملية الإفراز الفعال لشوارد الهدروجين إلى لمعة النبيب، وكذلك إعادة امتصاص الصوديوم والماء وإفراز البوتاسيوم بما يتناسب مع حالة البيئة الداخلية للجسم، وتتم هذه العملية بإشراف هرمون الألدوستيرون والهرمون المضاد للإبالة.

استتباب درجة حموضة سوائل الجسم

يرافق قيام الكائن الحي بوظائفه الاستقلابية تكوين بعض المركبات كحمض اللبن وحمض الكربون وحمض الفسفور وحمض كلور الماء. وهذه المواد وأمثالها يمكنها أن تتأين وتساهم في تغيير درجة حموضة pH سوائل الجسم، مما يسبب تغيراً في معدلات التفاعلات الاستقلابية للخلايا، لذلك تعمل جمل التنظيم في الجسم على مقاومة تبدلات درجة الحموضة بتدخل دارئات buffer الحموضة للحفاظ على استتباب الأوساط السائلة لجسم الإنسان بحدود 7,45 - 7,35 اعتماداً على مبدأ التلقيم الراجع السلبي. وإذا خرجت هذه القيمة عن هذا المعدل بـ ±0.5 تتخرب الإنزيمات المشرفة على الفعاليات الاستقلابية للخلايا، مما يؤدي إلى موت الخلايا.

يعتمد مبدأ عمل هذه الدارئات على الاتحاد مع أيونات الهدروجين إذا كان الوسط حامضياً، ومنحها المحلول أيونات الهدروجين إذا كان قلوياً لتمنع التبدلات الشديدة في تركيز أيونات الهدروجين. وتدعى مثل هذه الدارئات بالجمل الدارئة الكيميائية (كدارئة البيكربونات، ودارئة الفسفات، ودارئة البروتين وخضاب الدم)، والجمل الدارئة الجهازية (كدارئة جهاز التنفس، ودارئة جهاز الإطراح البولي).

تتدخل دارئة جهاز التنفس – مثلاً - بسرعة لتعديل درجة الـ pH لسوائل الجسم من خلال التحكم بعدد الحركات التنفسية وعمقها للتخلص من CO_2 فعند ازدياد كمية CO_2 المُنتجة في خلايا الجسم نتيجة ارتفاع معدل الاستقلاب الخلوي (كما يحدث في أثناء قيام الشخص بأعمال مجهدة) يزداد إنتاج CO_2 الذي يتفاعل مع الماء ليشكل حمض الكربون الذي يتأين إلى بيكربونات وأيونات الهدروجين كما في المعادلة (1):

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \longrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (1)$$

يؤدي ارتفاع إيونات الهدروجين H^+ في بلازما الدم إلى تنبيه المستقبلات الأبهرية والسباتية الموجودة في الجيوب الأبهرية والسباتية، وكذلك تنبيه المستقبِلات الكيميائية لمركز التنفس وتدفعه إلى إرسال معلومات إلى العضلات التنفسية لتزيد من معدل الحركات التنفسية وعمقها للتخلص من ثنائي أكسيد الكربون CO_2 الزائد، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض تركيزه في الدم والسائل الخلالي؛ مما يعيد تركيز أيونات الهدروجين في سوائل الجسم إلى حالتها الطبيعية، وبالتالي تعديل درجة الحموضة.

وبالعكس إذا انخفض تركيز أيونات الهدروجين في سوائل الجسم يثبط مركز التنفس، وينخفض معه معدل التهوية الرئوية؛ مما يرفع تركيز CO_2 وتركيز أيونات الهدروجين إلى قيمته الطبيعية.

أما عن دور الكلى في تنظيم درجة حموضة سوائل الوسط الداخلي للجسم والحفاظ على استتبابها ضمن الحدود الطبيعية فيتم عبر قدرة نفرونات (الأنابيب البولية) الكلية على التحكم بـ:

1. إعادة امتصاص البيكربونات.
2. اصطناع بيكربونات جديدة.
3. الحد النبيبي الأقصى للبيكربونات.
4. إفراغ أيونات الهدروجين.
5. إفراغ الأمونيا NH_3.
6. حموضة البول.

انتهت المحاضرة ... بالتوفيق للجميع