$$[K] = \frac{[v] . [\mu] . [\Delta L]}{[\Delta P]} = \frac{(L . T^{-1})(M . L^{-1} . T^{-1})(L)}{M . L \;\; . T^{-2} . L^{-2}} = L^2$$

لقد عبّر عن واحدة نفوذية الوسط المسامي بـالواحدة الدولية $1,02 . 10^{-12}\ m^2$ والـتي سميت بالدارسي (D) ، باستخدام المعادلات (٢-٢٢) ، (١-١٩) :

$$K = \frac{\mu . Q . \Delta L}{F . \Delta P} \qquad (٢-٢٥)$$

لنعوض القيم التالية في المعادلة (٢-٢٥) :

$$Q = 10^{-6}\ m^3/S\ ,\ \mu = 1\ c.P = 10^{-3}\ N . S / m^2$$
$$F = 10^{-4}\ m^2\ ,\ \Delta L = 10^{-2}\ m\ ,$$
$$\Delta P = 1\ atm = 9,81 . 10^{-4}\ kg/m.s^2$$

سنحصل على واحدة النفوذية $K = 1\ D$

فإذا مرر في وسط مسامي طولـه ١ سـم ومقطعـه ١ سـم٢ ، كمية مـن السـائل ١ سم٣/ثا ذي اللزوجة التحريكيـة اسنتي بـواز ، عندفـاقد ضـغـط ١ ضـغط جـوي ، فنفوذية هذا الوسط ستساوي واحد دارسي .ويمكن التعبـير عـن هـذه النفوذيـة ، مـن أجل الصخور ذات النفوذية الضعيفة ، بواحدة أصغر وهي الميلي دارسي .

$$1\ m D = 10^{-3}\ D$$

٢-٤- حدود استعمال قانون الارتشاح الخطي :

لقد أجريت أبحاث كثيرة حول دراسة حدود استخدام قانون الارتشاح الخطـي (قانون دارسي) ، ونتيجة لهذه الأبحاث تم التوصل إلى وجود مجموعتين من الأسباب التي تؤدي إلى الانزياح عن قانون دارسي :

١) الانزياح الناتج عن ظهور قوى العطالة عند سرعة ارتشاح عالية (الحدود العليـا لاستخدام قانون دارسي) .

٢) الانزياح عند سرعة ارتشاح منخفضة ، الناتج عن الخواص المرنـة غـير النيوتونيـة للسائل ، والتأثير المتبادل مابين هذه السوائل والجزء الصلب من الوسط المسـامي (الحدود الدنيا لاستخدام قانون دارسي) .

ليس من الضروري التوقف فقط عند الدراسة الكيفية للانزياح عن قانون الارتشاح الخطي ، بل ويجب دراسة هذا الانزياح كماً . وسنعرض فيمايلي عدداً من الأبحاث التي قام بها عدد من الباحثين حول الحدود التي يتم عندها الانزياح عن قانون دارسي :

٢-٤-١- بافلوفسكي (PAVLOVSKY) :

كان بافلوفسكي أول من ربط استخدام قانون دارسي بعدد رينولدز ، حيث إنه وكما في جريان السوائل في الأنابيب ، فإن عدد رينولدز هذا يعبر عن وجود نظام صفحي للجريان .

إن أول علاقة لبافلوفسكي عند جريان السائل في الأنابيب الأسطوانية كانت :

$$Re. = \frac{u \cdot D}{\nu} \qquad (٢-٢٦)$$

حيث إن : u - السرعة الوسطية للجريان في الأنبوب ، D - قطر الأنبوب

ν - اللزوجة الحركية (الكينماتيكية) للسائل .

عبر بافلوفسكي في هذه المعادلة عن جريان السائل من خلال صخر مثالي يتألف من قنوات مسامية أسطوانية متوازية ، ومن ثم قام بالانتقال إلى الصخر الحقيقي باستخدام مفهوم القطر الفعال وذلك بالمعادلة التالية :

$$Re = \frac{1}{0,75\, m + 0,23} \frac{v\, d_E}{\nu} \qquad (٢-٢٧)$$

حيث إن : m - المسامية ، v - سرعة الارتشاح ، d_E - القطر الفعال .

لقد وضع هذا الباحث تجريبياً القيم الحدية لعدد رينولدز المحصول عليه بالمعادلة (٢-٢٧) :

$$Re_{kr} = 7,5 - 9 \qquad (٢-٢٨)$$

يعني هذا أنه إذا كان عدد رينولدز المحصول عليه بالمعادلة (٢-٢٧) أقل من (7,5) فإن الجريان يحقق قانون دارسي ، أما إذا كان أكبر من (9) فإن القانون سينزاح عن قانون الارتشاح الخطي ، ويصبح الجريان غير خطي .

إن اتساع مجال القيم الحدية لعدد رينولدز يفسر بعدم الأخذ بعين الاعتبار بناء

الفراغات المسامية في المعادلة (٢-٢٧) . كذلك يؤثر انتقال الجريان من نظام ارتشاح معين إلى آخر على هذا المجال المحدد بالمعادلة (٢-٢٨) .

٢-٤-٢- م . د . ميليونشيكوف (MELLIONSHIKOV) :

لقد قام هذا الباحث باقتراح المعادلة التالية لحساب عدد رينولدز :

$$Re = \frac{1}{m^{1.5}} \cdot \frac{v\sqrt{K}}{\nu} \qquad (٢-٢٩)$$

أما القيم الحدية لعدد رينولدز المحسوب بالمعادلة (٢-٢٩) فكانت :

$$Re_{kr} = 0{,}022 - 0{,}29 \qquad (٢-٣٠)$$

٢-٤-٣- فينتشر ،لويس ، بيرنس (FINSHER , LOVES , BERNS) :

قام هؤلاء الباحثون في عام ١٩٣٣ ببحث جريان النفط والماء والهواء أو الغاز على٢٧ عينة رملية ورملية مسمنتة . حيث تتغير المسامية والنفوذية فيها ضمن مجال واسع (المسامية من ١٢,٣ وحتى ٣٧,٨٪ والنفوذية من ٣,١٣ وحتى ٣٠٠٠ ميلي دارسي) . فقد قاموا بتحليل نتائج تجاربهم ووجدوا أنه هناك علاقة تربط عدد رينولدز Re بالمقاومة الهيدروليكية λ .

من المعروف أن فاقد الضغ الناتج عن الاحتكاك في الأنابيب الأسطوانية العادية يعطى بالمعادلة التالية :

$$h = \lambda \frac{L}{D} \frac{w^2}{2g} \qquad (٢-٣١)$$

ومنه :

$$\lambda = \frac{2ghD}{Lw^2} \qquad (٢-٣٢)$$

حيث إن : λ ـ معامل المقاومة الهيدروليكية ، L ـ طول الأنبوب ،

D ـ قطر الأنبوب ، w ـ السرعة الوسطية لحركة السائل ، g ـ تسارع الجاذبية الأرضية .

وبضرب الصورة والمخرج في المعادلة (٢-٣٢) بالوزن النوعي للسائل $\gamma = \rho . g$ وبأخذ $\Delta P = h.\gamma$ بعين الإعتبار نحصل على :

$$\lambda = \frac{2\,D\,.\,\Delta P}{\rho\,.\,L\,.\,w^2} \qquad (٣٣-٢)$$

أما عدد رينولدز في هذه الحالة فيحدد بالمعادلة التالية :

$$Re = \frac{w\,.\,D\,.\,\rho}{\mu} \qquad (٣٤-٢)$$

ومن أجل الارتشاح في الوسط المسامي توصل هؤلاء الباحثون إلى المعادلتين التاليتين :

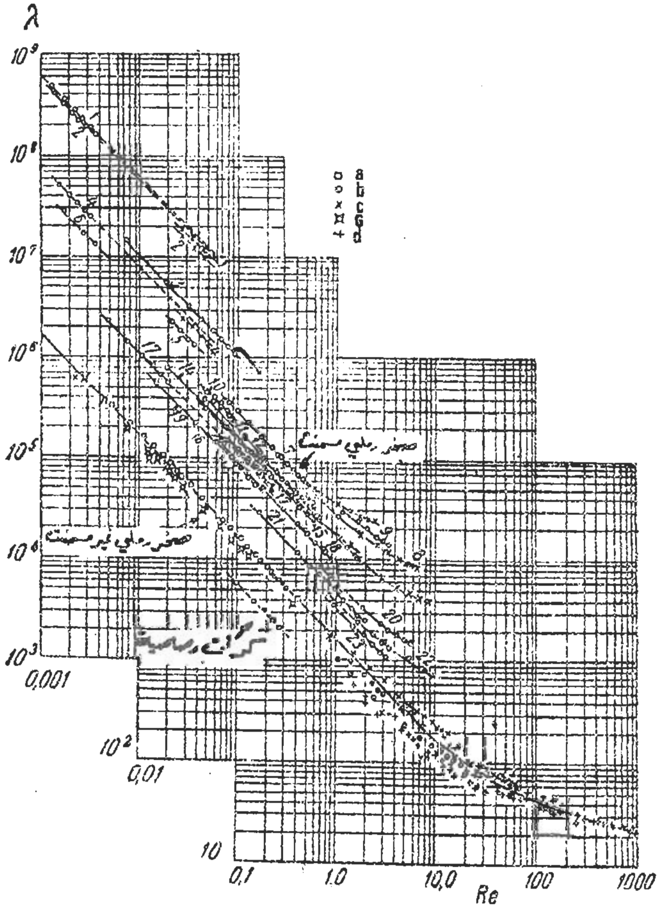
$$\lambda = \frac{d_E\,\Delta P}{2\,\rho\,v^2\,\Delta L} \qquad (٣٥-٢)$$

$$Re = \frac{v\,d_E\,\rho}{\mu} = \frac{v\,d_E}{\nu} \qquad (٣٦-٢)$$

حيث إن : ρ ـ كثافة السائل ، d_E ـ القطر الفعال للحبيبات المشكلة للوسط المسامي ، v ـ سرعة الارتشاح . ويحدد القطر الفعال بالمعادلة (١-١٧) .

بمقارنة المعادلتين (٢-٣٣) ، (٢-٣٤) مع (٢-٣٥) ، (٢-٣٦) نرى أن هؤلاء الباحثين استبدلوا كلاً من السرعة الوسطية لحركة جزيئات السائل ω وقطر الأنبوب D ،بسرعة الارتشاح v والقطرالفعال d_E للحبيبات المكونة للوسط المسامي ، حيث إن استخدام هذه المفاهيم هو الأصح لأنها تعطي القيم الأقرب إلى الحقيقة . وقد مثلت نتائج أبحاث هؤلاء الباحثين على الشكل (٢-٣) ، حيث وضع $\log Re$ على محور السينات ، بينما $\log \lambda$ على محور العينات .

من الواضح في الشكل (٢-٣) أنه عندما يكون $R_e < 1$ من أجل الصخور الرملية المسمنتة و $R_e < 4$ من أجل الصخور الرملية غير المسمنتة ، فإن المنحنيات ستكون خطوطاً مستقيمة لها زاوية ميل على محور السينات $135°$. أما من أجل $R_e > 1$ للصخور الرملية المسمنتة و $R_e > 4$ للصخور الرملية غير المسمنتة فإن العلاقة ستأخذ شكلاً منحنياً . أما الانتقال من الشكل المستقيم إلى المنحني سيكون بشكل انسيابي .



شكل (٢-٣) : علاقة معامل المقاومة الهيدروليكية λ بعدد رينولدز Re .

حيث إن الأرقام الموجودة فوق المنحنيات تمثل أرقام العينات .

لنكتب العلاقة الرياضية التي تمثل الجزء الخطي من الشكل البياني (٢-٣) مع الأخذ بعين الاعتبار أن زاوية ميل هذا الجزء على محور السينات هي 135 أي أن $tg135 = -1$.

$$\ell og\,\lambda = B - \ell og\,Re \qquad (٢-٣٧)$$

حيث إن : B - بعد نقطة تقاطع المستقيم مع محور العينات عن مبدأ الاحداثيات لنعوض قيم Re و من المعادلات (٢-٣٥) ، (٢-٣٦) في المعادلة (٢-٣٧) فنجد :

$$\ell og\left(\frac{d_E\ \Delta P}{2\ \rho\ v^2\ \Delta L}\right) = B - \ell og\left(\frac{v\ d_E\ \rho}{\mu}\right) \qquad (٢-٣٨)$$

ومنه :

$$B = \ell og\ A$$

حيث إن :

$$A = \frac{d_E^2\ .\ \Delta P}{2\ v\ \mu\ .\ \Delta L} \qquad (٢-٣٩)$$

ومنه فإن سرعة الارتشاح ستعطى بالمعادلة :

$$v = \frac{d_E^2\ .\ \Delta P}{2\ A\ .\ \mu\ .\ \Delta L} \qquad (٢-٤٠)$$

تعبر المعادلة (٢-٤٠) عن قانون دارسي ، وبمقارنتها مع المعادلة (٢-١٦) نجد أن :

$$\frac{1}{2A} = SL\ (m\ ,\ \varepsilon) \qquad (٢-٤١)$$

وبالتالي يمكن القول إن الجزء المستقيم من الشكل البياني يمثل قانون دارسي (الارتشاح الخطي) . أي أن القيم الحرجة لعدد رينولدز من أجل الصخور الرملية المسمنتة هي $Re_{kr} = 1$ ، أما للصخور الرملية غير المسمنتة $Re_{kr} = 4$ والتي تقابل سرعة حرجة معينة لكل نوع من الصخور .

إن السلبية الأساسية في المعادلة (٢-٣٦) هي أنه يجب حساب القطر الفعال للحبيبات المكونة للصخر . وبسبب وجود طرق متعددة لحسابه فإننا سوف نحصل على قيم مختلفة له ، وبالتالي سوف نحصل على قيم مختلفة لعدد رينولدز . كذلك من الصعب تحديد القطر الفعال d_E من أجل الصخور الكلسية والدولوميتيه ، وهذه السلبية تخص أيضاً علاقة بافلوفسكي (٢-٢٧) .

٢-٤-٤- شليكاتشوف (SHELLKACHOV) :

قلنا إنه من نواقص المعادلة (٢-٢٧) ، أنه يجب معرفة القطر الفعال للحبيبات المكونة للوسط المسامي . وبسبب وجود معادلات كثيرة مختلفة لحساب القطر الفعال فإننا سنحصل على قيم مختلفة لهذا القطر وبالتالي ستعطي نتائج غير دقيقة . لذلك فقد

قام شيلكاتشوف بدراسات واقتراح معادلة لحساب القطر الفعال للحبيبات المكونة للصخر اعتماداً على المعادلة (٢-٢١) :

$$d_{E} = \sqrt{\frac{K}{SL}} \qquad (٤٢-٢)$$

نعوض هذه القيمة في المعادلة (٢-٢٧) فنحصل على :

$$Re = \frac{1}{0,75\,m + 0,23} \cdot \frac{v\,\sqrt{K}}{\nu\,\sqrt{SL}} \qquad (٤٣-٢)$$

كذلك فقد اعتمد على المعادلة التي يحسب بها عدد سليختر (٢-١٥) :

$$SL = \frac{n^2}{96\,(1 - m)}$$

وبتعويض هذه القيمة بالمعادلة (٢-٤٣) نجد :

$$Re = \frac{1}{0,75\,m + 0,23} \; \frac{v\sqrt{96\,(1 - m)\,K}}{\nu \,.\, n} \qquad (٤٤-٢)$$

كذلك فقد توصل إلى المساواة التالية :

$$\frac{\sqrt{96\,(1 - m)}}{n\,(0,75\,m + 0,23)} \cong \frac{10}{m^{2,3}}$$

وبالتعويض في المعادلة (٢-٤٤) نحصل على معادلة شيلكاتشوف لحساب عدد رينولدز :

$$Re = \frac{10}{m^{2,3}} \cdot \frac{v\,\sqrt{K}}{\nu} \qquad (٤٥-٢)$$

والقيمة الحرجة لهذه المعادلة تقع ضمن المجال :

$$Re_{kr} = 1 - 12 \qquad (٤٦-٢)$$

إن ميزة المعادلة (٢-٤٥) عن المعادلة (٢-٢٧) هي أنها تستخدم أيضاً من أجل الصخور الرملية المسمنتة والكلسية والدولوميتية ، لأن قيم المسامية والنفوذية معروفة ، ولكن لدى إجراء الحسابات بالمعادلتين السابقتين حصل على توافق في النتائج ، وذلك من أجل الصخور الوهمية والصخور ذات الحبيبات المتوضعة توضعاً جيداً .

كذلك وللسهولة قام الباحث شيلكاتشوف باقتراح معامل جديد لاواحدة له ،

سماه بمعامل دارسي ويحسب بالعلاقة التالية :

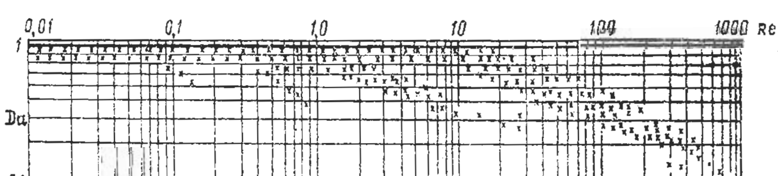
$$Da = \frac{v \cdot \mu / K}{\Delta P \;/\; L} = \frac{v \cdot \mu \cdot L}{K \cdot \Delta P} \qquad (٤٧-٢)$$

نلاحظ من هذه المعادلة أن معامل دارسي يعتبر نسبة قوة الإحتكاك الناتجة عن لزوجة السائل إلى القوة الناتجة عن الضغط .وبمقارنة هذه المعادلة مع قانون دارسي (٢-٢٢) ، مع الافتراض بأن الطبقة أفقية ($P^* = P$) ، نجد أن معامل دارسي مساوٍ الواحد .

$$Da = 1 \qquad (٤٨-٢)$$

إن المساواة في المعادلة (٢-٤٧) تتحقق فقط عندما يكون $Re < Re_{kr}$. وإن إدخال مفهوم معامل دارسي يسهل بحث حدود استعمال قانون الارتشاح الخطي . فإذا وضعنا $\ell og\,Re$ على محور السينات و $\ell og\,Da$ على محور العينات ، سيكون هذه العلاقة خطية عندما يكون $\ell og\,Da = 0$ أي عندما يكون $Re < Re_{kr}$ ، وعندما يبدأ المنحني بالإبتعاد عن محور السينات فإن الجريان سيبدأ بالإنزياح عن قانون دارسي (عندما يكون $\ell og\,Da < 0$ ، $Da < 1$) ، وعدد رينولدز المقابل لنقطة إنحراف المنحني سيمثل القيمة الحرجة له .

ولإيضاح ماسبق بيانياً على الشكل (٢-٤) ، كانت قد رسمت العلاقة مابين $\ell og\,Re$, $\ell og\,Da$ على شبكة لوغاريتمية ، والتي تمثل نتائج تحليل التجارب التي قام بها الباحث (عبدو اللاغابوف ABDOLLAGABOV) بناء على علاقات شيلكاتشوف (الجدول رقم ٢-١) . فالمنحنيات التي تبتعد عن محور السينات ($\ell og\,Re$) تمثل الإرتشاحات غير الخطية حيث ($\ell og\,Da < 0$) من أجل عدة عينات من الوسط المسامي .



شكل (٢-٤) : علاقة معامل دارسي بعدد رينولدز

أجرى شيلكاتشوف تحليلاً للمعادلات التي حصل عليها الباحثون من أجل تحديد Re في هيدروليك الموائع الجوفية وتوصل إلى القيم الحرجة الممكنة لعدد رينولدز (Re_{kr}) والممثلة في الجدول (٢-١) حيث ومن الجدول هذا وفي الأعمدة (من ٤ حتى ٨) يمكن أن نلاحظ أن عدد رينولدز يتعلق بـ ($\sqrt{K}$) في المعادلات كافة ، وإن هذه المعادلات متشابهة ويمكن استخدامها عملياً .

والصفة المميزة لهذه المعادلات أنها تعطي مجالاً واسعاً لعدد رينولدز الحرج (Re_{kr}) من أجل عدة أنواع للوسط المسامي ، وهذا ناتج عن الاختلاف في خواص الوسط المسامي المستخدم في البحث . كذلك لاتدخل في هذه المعادلات معاملات كافية للوصف الكامل للوسط المسامي المعقد التركيب ، لذلك فإن استخدام تعابير المسامية والنفوذية غير كاف .

من الممكن تقسيم مجال تغير قيمة (Re_{kr}) إلى مجالات ضيقة مطابقة لكل مجموعة من عينات الوسط المسامي ، والذي يسهل تحديد حدود استخدام قانون دارسي عند حركة السوائل في أي نوع من الوسط المسامي .

ولقد أظهرت الدراسات التي جاءت فيما بعد أن حدود واستخدام عدد رينولدز الممثلة بالمعادلتين (٢-٣٠) ، (٢-٤٦) ، يجب أن تكون أوسع من ذلك .

نلاحظ مما سبق أن هناك شكلاً عاماً لكل المعادلات (٢-٢٩) ، (٢-٤٥) يمكن كتابته على الشكل التالي :

$$Re = \frac{v\sqrt{K}}{\nu} f(\varepsilon, c_1, m) \qquad (٢-٤٩)$$

حيث إن : ε - خشونة الجدران الداخلية للقنوات المسامية ، c_1 ــ معامل التعرج ويساوي نسبة الطول الحقيقي للقناة المسامية إلى طول الخط المستقيم الواصل بين بداية ونهاية القناة المسامية .

الجدول (٢-١) : تعيين الحدود العليا لاستخدام قانون دارسي حسب نتائج أبحاث عدة .

المعامل	بافلوفسكي ن . ن	فيشنر ، لويس ميرس	شيلكاتشوف ف . ن	ميليونتشيكو ف م . د	كرباتشوف ف . ي ترتيين غ . ف	مينسكي ي . م	عبادوللاشوف أ . ي
1	2	3	4	5	6	7	8
Re	$\frac{v \cdot d_E}{(0,75\,m + 0,23)\nu}$	$\frac{v\,d_E}{\nu}$	$\frac{10\,v\sqrt{K}}{m^{2,3}\,\nu}$	$\frac{v\sqrt{K}}{m^{1,5}\nu}$	$\frac{4\sqrt{2}\,v\sqrt{K}}{m^{1,5}\,\nu}$	$\frac{v\sqrt{K}}{\nu}$	$\frac{12(1-m)v\sqrt{K}}{m^{2}\nu}$
λ	-	$\frac{d_E\,\Delta P}{2L\,\rho\,v^2}$	$\frac{2m^{2,3}\sqrt{K}\,\Delta P}{L\,\rho\,v^2}$	$\frac{m^{1,5}\sqrt{K}\,\Delta P}{2L\,\rho\,v^2}$	$\frac{2m^{1,5}\sqrt{K}\,\Delta P}{L\,\rho\,v^2}$	$\frac{\sqrt{K}\,\Delta P}{2L\,\rho\,v^2}$	$\frac{4,6(1-m)m^{2}\sqrt{K}\,\Delta P}{L\,\rho\,v^2}$
Re . λ	-	$\frac{0,5}{f(m)Da}$	$\frac{20}{Da}$	$\frac{0,5}{Da}$	$\frac{8\sqrt{2}}{Da}$	$\frac{0,5}{Da}$	$\frac{55,2(1-m)^2}{Da}$
Re_{kr}	7,5 - 9	1 - 4	0,032 - 14	0,0015 - 0,60	0,0085 - 3,4	-	0,019 - 8,1

وأخيراً يمكن القول بأنه في بعض حالات ارتشاح السوائل قد يحدث إنزياحٌ عن قانون الارتشاح الخطي ، ومن الواضح في العلاقات السابقة أن هذا الانزياح يزداد كلما كبرت سرعة حركة السائل وأقطار الحبيبات المكونة للوسط المسامي . فالسرعة الحرجة هي السرعة التي يبدأ عندها الانزياح عن قانون الإرتشاح الخطي . والجدول (٢-١) يوضح تناقص كل من سرعة الارتشاح الحرجة والانحناء الهيدروليكي عند زيادة قطر الحبيبات المكونة للوسط المسامي .

جدول (٢-٢) : نتائج الدراسات والأبحاث التي أجريت لتعيين قيمة سرعة الارتشاح الحرجة

قطر الحبيبات d , mm	سرعة الارتشاح الحرجة v_{kr} , cm/S	الانحناء الهيدروليكي i
0,57	1,03	6,67
0,90	0,61	1,63
1,35	0,35	0,54

لقد تم الحصول على هذه النتائج لدى دراسة ارتشاح الماء خلال طبقات رملية ذات حبيبات كبيرة .

إن كافة الدراسات التي تمت كانت قد اهتمت بالإخلال بقانون دارسي فقط ، لذلك يظهر لدينا سؤال هام هو : هل يؤدي الإخلال بقانون دارسي إلى إخلال بصفحية الجريان ؟ يمكن الإجابة على هذا السؤال بالنفي . فلقد أثبتت التجارب التي أجريت حول هذا الموضوع أنه عند الإخلال بقانون دارسي يبقى الجريان صفحياً ، حيث أن اضطرابية الجريان يمكن أن تظهر فقط عند قيم أكبر بكثير من القيم الحرجة لعدد رينولدز (Re_{kr}) التي تم الحصول عليها سابقاً . وهنا يظهر سؤال آخر : كيف يفسر الإخلال بقانون دارسي ؟ .

يظهر دور قوى العطالة عند زيادة سرعة حركة السائل أو الغاز في الوسط المسامي حيث إنه ستتغير قيم واتجاه سرعة جزيئات السائل بشكل كبير بسبب تعرج القنوات المسامية وتغيّر مقاييسها . فالتغيرات الكبيرة في السرعة تعني وجود قوى

عطالة كبيرة والتي تؤدي إلى الإخلال بقانون دارسي .

وهكذا فإن الإخلال بقانون دارسي للارتشاح لايعني الإخلال بالنظام الصفحي للجريان .

٢-٥- قوانين الارتشاح غير الخطية :

لقد ذكرنا سابقاً أن قانون الارتشاح ينزاح عن قانون الارتشاح الخطي عند ازدياد Re عن Re_{kr} وذلك بسببين :

١) وجود سرعة ارتشاح كبيرة $v > v_{kr}$.

٢) كبر قطر الحبيبات المكونة للوسط المسامي (عند سرعة ارتشاح صغيرة) .

٢-٥-١- سرعة ارتشاح كبيرة :

لدى استثمار الآبار التامة هيدروديناميكياً ستكون سرعة الارتشاح عادة أصغر من السرعة الحرجة $v < v_{kr}$ ، عندئذ لن يحدث انزياح عن قانون الارتشاح الخطي . أما في الواقع تكون أغلب الآبار غير تامة،حيث يتم التدفق إلى البئر من خلال الثقوب الموجودة في مواسير التغليف أي أن سطح الارتشاح سيصغر ويكون مساوياً :

$$F = \frac{\pi D^2}{4} . n . b \qquad (٢-٥٠)$$

حيث إن : D ـ قطر الثقب ، n ـ عدد الثقوب في المتر الطولي من المواسير ، b ـ سماكة الطبقة .

وكما هو معروف أن سرعة الارتشاح تعطى بالعلاقة التالية :

$$v = \frac{Q}{F} \qquad (٢-٥١)$$

حيث إن Q ـ التدفق الحجمي للسائل (الإنتاجية) .

وبالتالي فإن سرعة الارتشاح ستزداد بشكل كبير وتصبح أكبر من السرعة الحرجة وسينزاح قانون الارتشاح عن القانون الخطي .

لقد أجريت أبحاث كثيرة حول الانزياح عن قانون الارتشاح الخطي وسنلخصها فيما يلي :

لقد أعطى الباحث بوزيرفسكي (POZERVSKY) علاقة تربط سرعة الارتشاح