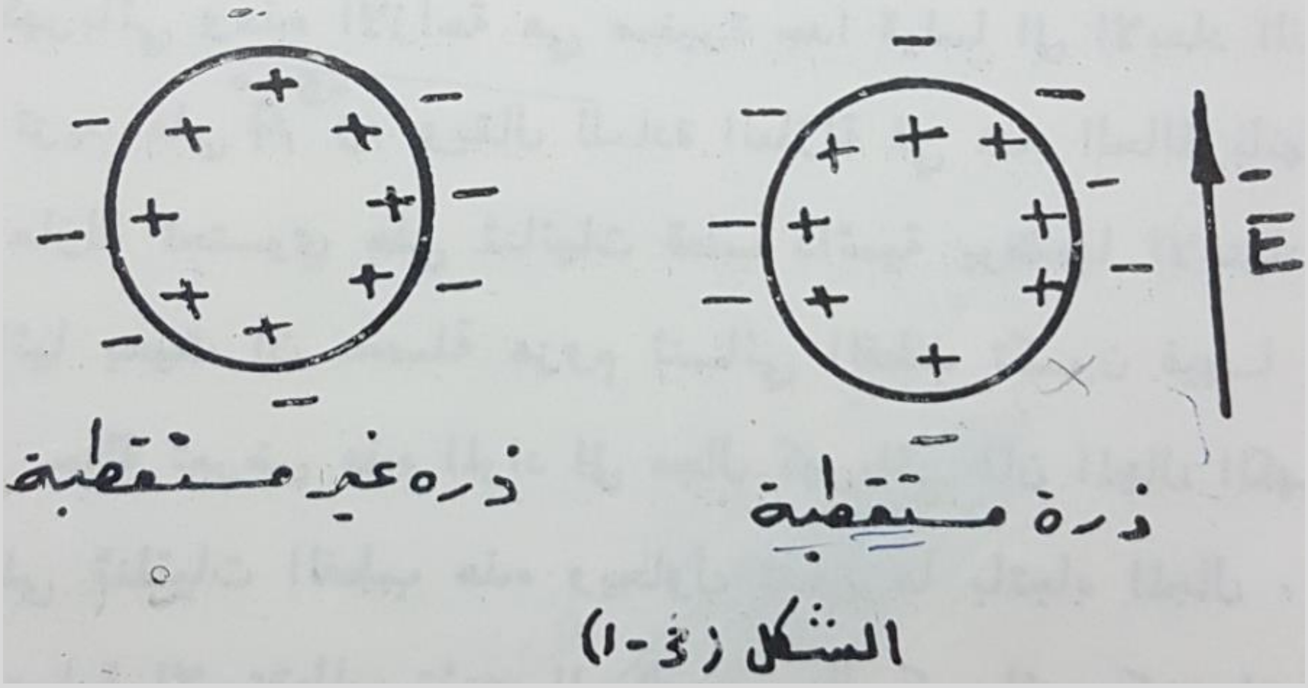
## (3-1) المقدمــة

تختلف المواد العازلة عن المواد الموصلة في كونها لا تمتلك الكترونات حرة الحركة تنساب داخل المادة تحت تاثير المجال الكهربائي ومن الامثلة على هـذه المـواد ، الزجاج والمايكا والمواد البلاستيكية والورق والشمع ... الخ . والمجال الكهربائي يؤثر في ايونات أو ذرات المواد العازلة التي هي عبارة عن شحنات سالبة وشحنات موجبة حيث يحدث اختلالا في حالة توازن الشـحنات وتبتعد الشـحنات الموجبـة باتجـاه المجال الكهربائي بينما تزاح الشحنات السالبة بالاتجـاه المعاكس مكـونة ثنائي قطب كهربائي وهذه الازاحة هي صغيرة جدا قياسا الى الابعاد الذرية للمادة حيث أنها لا تزيد على $10^{-5}$ Å ويقال للمادة العازلة في هذه الحالة بأنها استقطبت

## (3-2) النظرية المجهرية لاستقطاب المواد العازلة

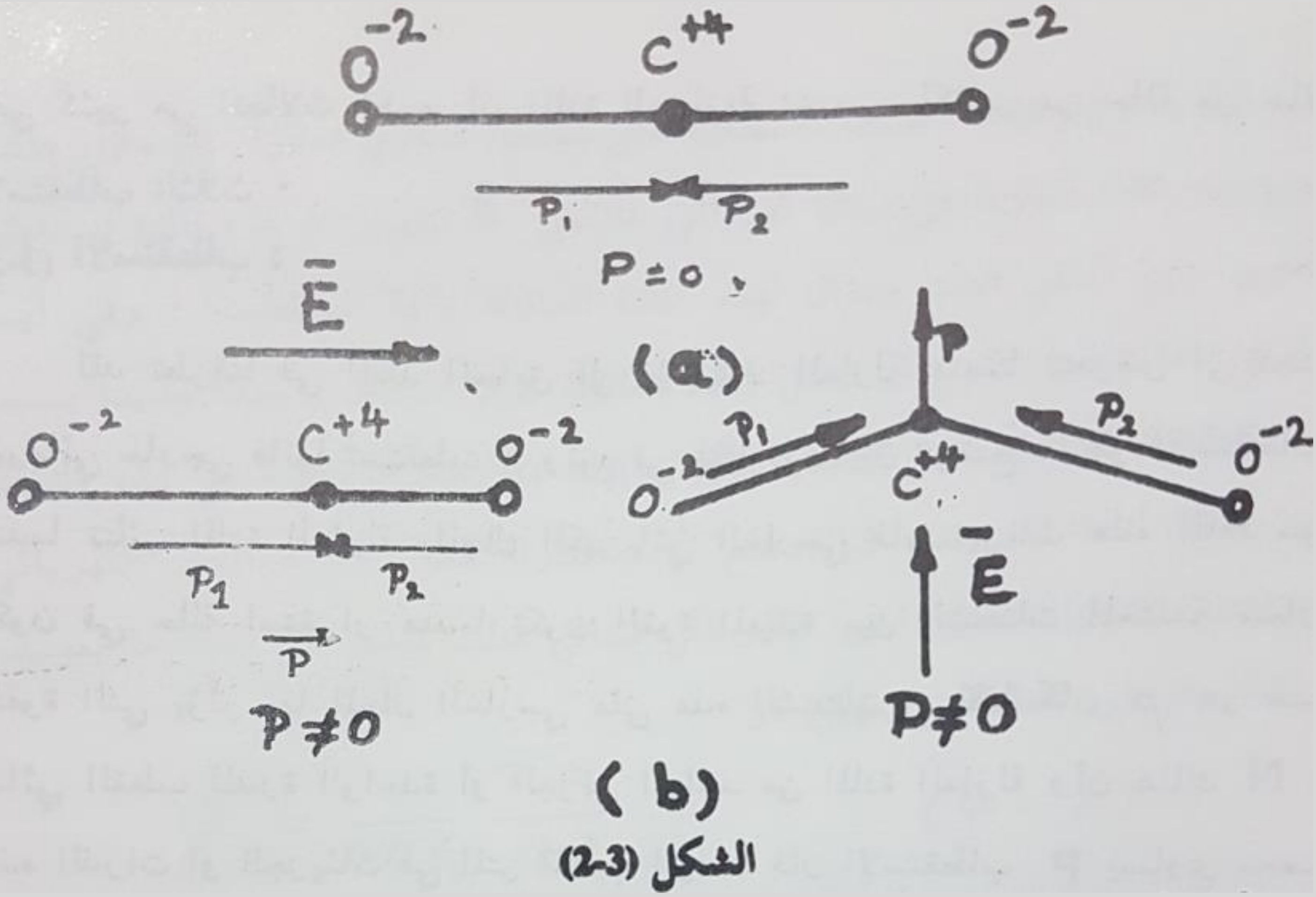
عندما تقع المواد العازلة تحت تأثير مجال كهربائي فانها تستقطب كما ذكرنا ولنناقش الان ما يحدث عند تعرض المواد العازلة الى مجال كهربائي ومن المعلوم ان ذرات المواد العازلة تتكون من شحنة موجبـة في الوسط ( النـواة ) تحيط بهـا سحابة من الالكترونات ( شحنة سالبة ) وان مركـز كتلة الشحنـات السالبة منطبق

على مركز كتلة الشحنات الموجبة في حالة عـدم وجود مجال كهربائي خارجي وبهذا يكون عزم ثنائي القطب مساويا الى الصفر ٠ أما اذا تعرضت المادة العازلة الى مجال كهربائي خارجي فان مركز الكتلة للشحنات الموجبة سوف يزاح باتجاه المجـال والسالبة بالاتجاه المعاكس وتكون ثنائيات قطب وينتج عن ذلك أن المادة العازلة سوف تمتلك عزم ثنائي قطب ويقال أن المادة استقطبت ويسمى هـذا النـوع من الاستقطاب بالاستقطاب الاليكتروني أو المحتث electronic polarization or induced polarization انظر الشكل (3-1).



الشكل (3-1)

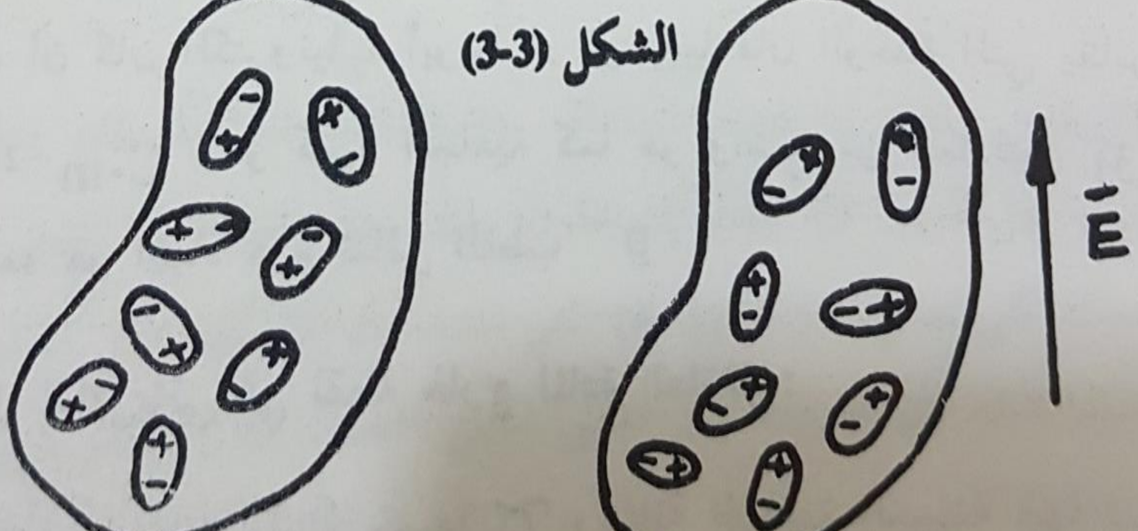
في حالة الجزيئات التي تتعرض الى تاثير مجال كهربائي خارجي فانها تستقطب ايضا ويسمى نوع الاستقطاب في هذه الحالة بالاستقطاب الايوني ionic polarization ويعتمد هذا على البناء التأصري للايونات المكونة لهذا الجزيء ومثالا على ذلك لنأخذ جزيئات ثاني اوكسيد الكربون الذي نرى فيه أن ايونات الاوكسجين تقع متناظرة بالنسبة لايون الكربون في حالة عدم تعرض الجزيء الى مجال كهربائي خارجي كما في الشكل (a-2-3) وتكون محصلة عزم ثنائي القطب مساوية الى الصفر ٠ أما اذا تعرض هذا الجزيء لتاثير مجال كهربائي خارجي فان موقع أيونات الاوكسجين والكربون يتغير بالنسبة لبعضها البعض وتكون محصلة عزم ثنائي القطب ليست مساوية الى الصفر ويكون اتجاهها باتجاه شدة المجال الخارجي كما في الشكل (b2-3) ٠



الشكل (2-3)

أما النوع الثالث من الاستقطاب فهو النوع الخاص ببعض المواد التي تسمى المواد القطبية polar materials والتي تمتلك جزيئاتها عزم ثنائي قطب بصورة دائمية حتى في حالة عدم تعرضها الى مجال كهربائي خارجي ولكن محصلة هذه العزوم تكون مساوية الى الصفر لانها موزعة في المادة بصورة عشوائية [انظر الشكل (3-3)] في حالة وقوعها تحت تأثير مجال كهربائي فان ثنائيات القطب فيها تتأثر بعزم يحاول تدويرها باتجاه المجال وبهذا تكون محصلة عزوم ثنائي القطب لهذه المادة مساويا الى الصفر ومن الامثلة المعروفة لهذه المواد الماء.ولكن الطاقة الحركية لجزئيات المادة ( الطاقة الحرارية ) تحاول دائما أن تجعل عزم ثنائيات القطب موزعة بشكل عشوائي بالرغم من وجود المجال الكهربائي الخارجي لذلك فان الاستقطاب في هذه المواد يعتمد بصورة كبيرة على درجة الحرارة ويسمى هذا النوع من الاستقطاب بالاستقطاب التوجيهي (orientational polarization)

الشكل (3-3)



## (3-3) الاستقطاب

لقد تطرقنا في البند السابق الى أن المواد العازلة عندما تتعرض الى مجال كهربائي خارجي فانها تستقطب . ونود في هذا البند أن نوضح ما هو الاستقطاب : عندما تتأثر المادة العازلة بالمجال الكهربائي الخارجي فان ايونات هذه المادة سوف تكون في حالة استقرار عندما تكون القوة المعيدة بين الشحنات المختلفة مساوية للقوة التي يؤثر بها المجال الخارجي على هذه الشحنات . فاذا كان $p$ هو عزم ثنائي القطب للذرة الواحدة أو الجزئي الواحد من المادة العازلة وأن هناك $N$ من هذه الذرات او الجزيئات في المتر المكعب الواحد فان الاستقطاب $P$ يساوي محصلة عزوم ثنائيات الاقطاب في المتر المكعب من تلك المادة ويمكن كتابة الصيغة الرياضية كالاتي :

$$\bar{P} = N\bar{p} \qquad (1-3)$$

واذا كانت المادة العازلة تحتوي على $n$ من أنواع الذرات أو الجزيئات في تركيبها وان عزم ثنائي القطب لكل نوع هو $p_i$ وان عدد الذرات او الجزيئات في وحدة الحجوم هو $N_2$ فان $P$ في هذه الحالة تكون :

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{m} N_i \bar{p}_i \qquad (2-3)$$

ويمكن تعريف الاستقطاب بشكل آخر فاذا كان عزم ثنائي القطب في حيز ما حجمه $d\tau$ هو $dp$ فان

$$\bar{P} = \frac{d\bar{p}}{d\tau} \qquad (3-3)$$

ومن هذا نجد أن الاستقطاب يتغير بتغير الموضع داخل المادة العازلة . وليس مهما نوع الاستقطاب أن كان الكترونيا ، أيونيا او توجيهيا فان الوحدة التي يقاس بها الاستقطاب هي $C \cdot m^{-2}$ وهو كمية اتجاهية كما هو واضح من المعادلتين (1-3) و (3-3) واتجاهه هو اتجاه عزم ثنائي القطب $\bar{p}$ .

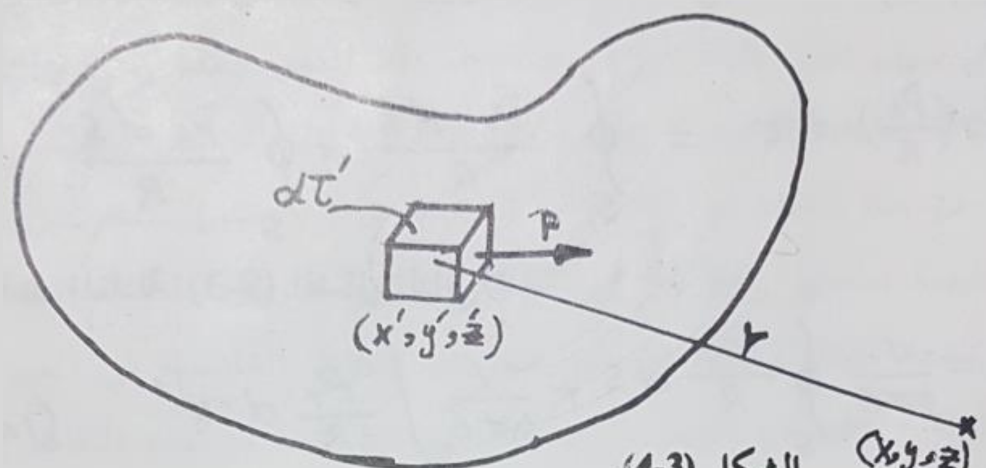
## (4-3) شدة المجال الكهربائي في نقطة خارج المادة العازلة

نتصور حيزا من مادة عازلة حجمها ($\tau$) وكثافة الشحنة الحجمية فيها تساوي

صفرا ($\rho = 0$) وكثافة الشحنة السطحية على سطحها تساوي صفرا ($\sigma=0$) عندما توضع هذه المادة العازلة في مجال كهربائي خارجي $E^-$ فان ذرات هذه المادة تستقطب وتكتسب عزم ثنائي قطب ويقال لهذه المادة العازلة بأنها استقطبت . وفي اية نقطة في هذا الحيز خارج او داخل المادة العازلة سوف يستحدث جهدا جديدا بسبب عزوم ثنائيات القطب داخل المادة العازلة وبهذا فان مقدار الجهد في هذه النقطة سوف يختلف عما كان عليه قبل وضع المادة العازلة كما أن شدة المجال الكهربائي سوف تتغير . ان مقدار الجهد الكهربائي لثنائي قطب صغير في نقطة ما بعيد، عنه كما جاء في المعادلة (2-34) هو :

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\bar{P} \cdot \bar{e}_r}{r^2} \qquad (4-3)$$

ويمكن تعميم هذه العلاقة لتشمل جميع ثنائيات القطب ( المادة العازلة المستقطبة ) لنحسب شدة المجال في نقطة واقعة خارج المادة العازلة احداثياتها (x,y,z) انظر




الشكل (4-3)

الشكل (3-4) وذلك باستعمال المعادلة (3-3) ومما تجد ملاحظته هنا ان النقطة التي نحسب بها الجهد $\phi$ يجب أن تكون بعيدة عن الحجم $\tau$ الذي تشغله المادة العازلة وذلك لكي تصح العلاقة (3-4) التي استخدمت للحصول على المعادلة (3-5) . وعلى سبيل المثال فان الازاحة بين قطبي ثنائي القطب تكون حوالي $1A^\circ$ وعلى هذا فان بعد النقطة التي نحسب فيها الجهد عن المادة العازلة يجب ان لا يقل عن $10A^\circ$ وذلك باستعمال العلاقة :

$$\frac{\bar{e}_r}{R^2} = -\nabla\left(\frac{1}{R}\right) = +\nabla'\left(\frac{1}{R}\right) \qquad (6-3)$$

اذ أن المؤثر $\nabla'$ وكذلك الحجم الذي تشغله ثنائيات القطب $d\tau'$ يحسب من النقطة التي احداثياتها $(x', y', z')$ وبهذا تأخذ المعادلة (3-5) الشكل التالي :

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\tau'} \bar{P}\cdot\nabla'\left(\frac{1}{R}\right) d\tau' \qquad (7-3)$$

وهذه العلاقة الاخيرة يمكن وضعها بشكل آخر وذلك باستعمال المتطابقة التالية :

$$\nabla'\cdot\left(\frac{\bar{P}_r}{R}\right) = \frac{1}{R}\nabla'\cdot\bar{P}_r + \bar{P}_r\cdot\nabla'\left(\frac{1}{R}\right) \qquad (8-3)$$

حيث أن العلاقة (3-7) تأخذ الشكل التالي :

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left[\int_{\tau'}\nabla'\cdot\left(\frac{\bar{P}_r}{R}\right) d\tau' + \int -\frac{\nabla'\cdot\bar{P}_r}{R}\, d\tau'\right] \qquad (9-3)$$

وباستعمال مبرهنة كاوس فيمكن تحويل الحد الاول في المعادلة (3-9) الى تكامل سطحي اذ أن :

$$\int_{\tau'}\nabla'\cdot\left(\frac{\bar{P}_r}{R}\right) d\tau' = \oint_S \frac{\bar{P}_r\cdot d\bar{s}}{R} = \oint_S \frac{P_r\, ds}{R}$$

وهكذا تأخذ المعادلة (3-9) الشكل التالي :

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\oint_S \frac{\sigma_p}{R}\, dS + \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\tau'}\frac{\rho_p}{R}\, d\tau' \qquad (10-3)$$

اذ أن

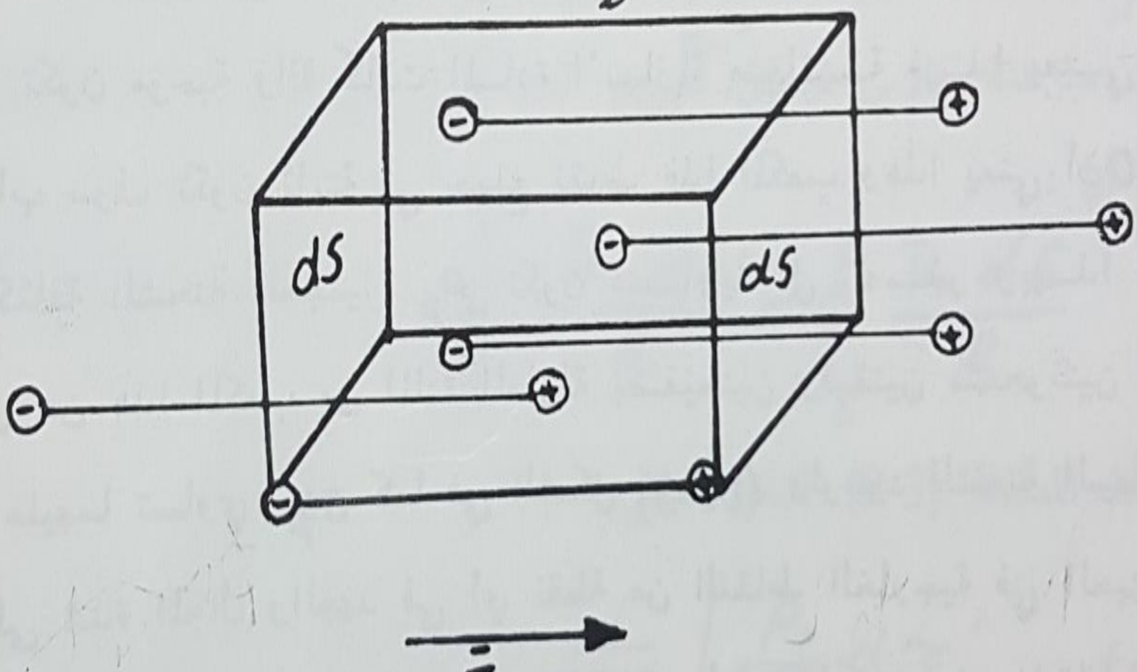
$$\sigma_p = P_r \qquad (11-3)$$

$$\rho_p = -\nabla\cdot\bar{P}_r \qquad (12-3)$$

وتسمى $\sigma_p$ كثافة الشحنة السطحية للاستقطاب و $\rho_p$ كثافة الشحنة الحجمية

للاستقطاب ومن الجدير بالذكر هنا ان اضافة .

الحرف (p) في نهاية كل من $\rho$ و $\sigma$ لنفرقهما عن $\rho_f$ و $\sigma_f$ وهما كثافة الشحنة الحجمية وكثافة الشحنة السطحية للشحنات الحرة طليقة الحركة كما أن هاتين الكميتين اي $\rho_p$ و $\sigma_p$ هما مقداران حقيقيان نتجا عن استقطاب المادة العازلة . والان لنتصور عنصرا حجميا صغيرا في المادة العازلة مساحة سطحه الجانبي $dS$ كما في الشكل (3-6) . وبتأثير المجال الكهربائي تنفصل الشحنات الموجبة عن السالبة بازاحة مقدارها $l$ حيث تندفع الشحنات الموجبة بأتجاه المجال لتقطع السطح $dS$ الى اليمين أما الشحنات السالبة فتتحرك بالاتجاه المعاكس لتقطع السطح $dS$ الى اليسار . كمية الشحنة $dQ$ التي تقطع السطح $dS$ الى اليمين هي الشحنة الكلية في متوازي المستطيلات الموضح في الشكل (3-6) .




الشكل (3-6)

$$dQ = NQ\bar{l} \cdot d\bar{S} \qquad (13-3)$$

على اعتبار أن Q هي شحنة نهايتي ثنائي القطب و $N$ عدد الجزيئات في وحدة الحجوم ويمكن كتابة العلاقة (13-3) بالشكل التالي :

$$dQ = \bar{p} \cdot d\bar{s} \qquad (14-3)$$

على اعتبار أن عزم ثنائي القطب p يساوي $Ql$ وان الاستقطاب $P$ يساوي Np ٠ والمعادلة (14-3) يمكن كتابتها بالشكل التالي :

$$dQ = \bar{p} \cdot \bar{n}\, ds \qquad (15-3)$$

اذ أن $\bar{n}$ هو وحدة المتجه العمودية على السطح $ds$ ، ومن هذا نجد ان :

$$\sigma_p = \frac{dQ}{ds} = \bar{p} \cdot \bar{n} = \bar{P}_n$$

اي أن كثافة الشحنة السطحية المحتثة على سطح المادة العازلة تساوي عدديا المركبة العمودية للاستقطاب على ذلك السطح ٠

وبنفس الطريقة بمكننا أن نثبت أن $-\nabla \cdot P$ يساوي كثافة الشحنة الحجمية المحتثة داخل المادة العازلة حيث أن الشحنات التي تنساب ( تتحرك ) الى الحجم $d\tau$ ( متوازي المستطيلات ) خلال السطح $ds$ هو $\bar{p} \cdot d\bar{s}$ وكما جاء في المعادلة (15-3) ومعنى هذا أن الشحنة الكلية التي تمر خلال السطح S الذي يحيط بالحجم $\tau$ هو :

$$Q = \int_s \bar{p} \cdot d\bar{s} \qquad (16-3)$$

أي أن مقدار الشحنات الباقي في داخل الحجم $\tau$ هو Q - حيث أن المادة العازلة متعادلة الشحنات فاذا اعتبرنا ان $\rho_p$ هو كثافة الشحنات الحجمية داخل الحجم $\tau$ نستنتج من هذا أن :

$$\int_{\tau} \rho_p \, d\tau = -Q \qquad (17\text{-}3)$$

ومن المعادلتين (3-16) و (3-17) نحصل على :

$$\int_{\tau} \rho_p \, d\tau = -\int_{s} \bar{P} \cdot d\bar{S} \qquad (18\text{-}3)$$

وباستعمال مبرهنة كاوس يمكن تحويل التكامل السطحي في المعادلة (3-18) على الجانب الايمن الى تكامل حجمي حيث نحصل على ..

$$\int_{\tau} \rho_p \, d\tau = -\int_{s} \bar{P} \cdot d\bar{S} = -\int_{\tau} \nabla \cdot \bar{P} \, d\tau \qquad (19\text{-}3)$$

وبما أن هذه المعادلة تصح للحجم $d\tau$ الذي هو نفسه في التكاملين الواردين في المعادلة (3-19) لذلك فان :

$$\rho_p = -\nabla \cdot \bar{P} \qquad (20\text{-}3)$$