



# ΗΜΙΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ: ΘΕΩΡΙΑ-ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Μέρος 2<sup>ο</sup>: Αρχές λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων  
Ενότητα 15<sup>η</sup>: Διπολικό τρανζίστορ επαφής: λειτουργία.

Γεώργιος Λιτσαρδάκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
& Μηχανικών Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# 15. Διπολικό τρανζίστορ επαφής: λειτουργία.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



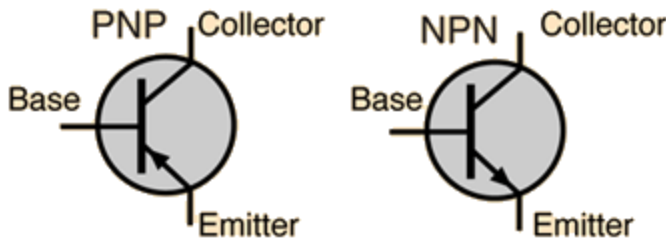
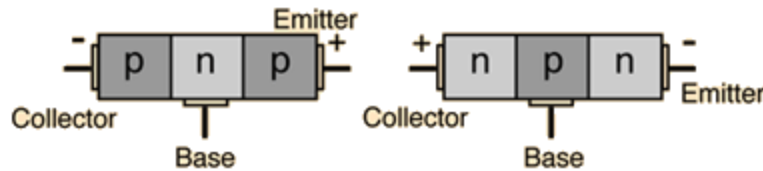
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Περιγραφή,
2. Χαρακτηριστική I-V.
3. Ενίσχυση τάσης (συνδεσμολογία κοινής βάσης) – ροή φορέων.
4. Ενίσχυση ρεύματος (συνδεσμολογία κοινού εκπομπού).



# Διπολικό τρανζίστορ επαφής



Τρανζίστορ pnp και npn

Πηγή: HyperPhysics, R Nave Georgia State University

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/imgsol/tran1.gif>

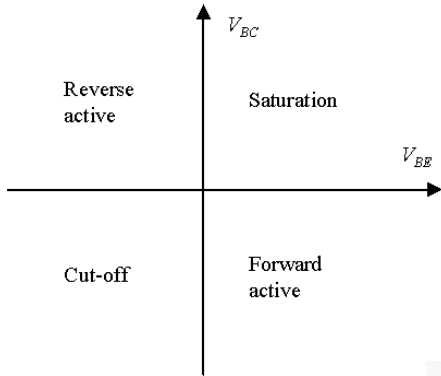
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/trans.html>

Δύο επαφές p-n, με κοινή την περιοχή n (τύπος **p-n-p**) ή την περιοχή p (τύπος **n-p-n**).

Η κοινή περιοχή μεταξύ των δύο επαφών λέγεται **βάση (B)** και οι άλλες δύο περιοχές **εκπομπός (E)** και **συλλέκτης (C)**

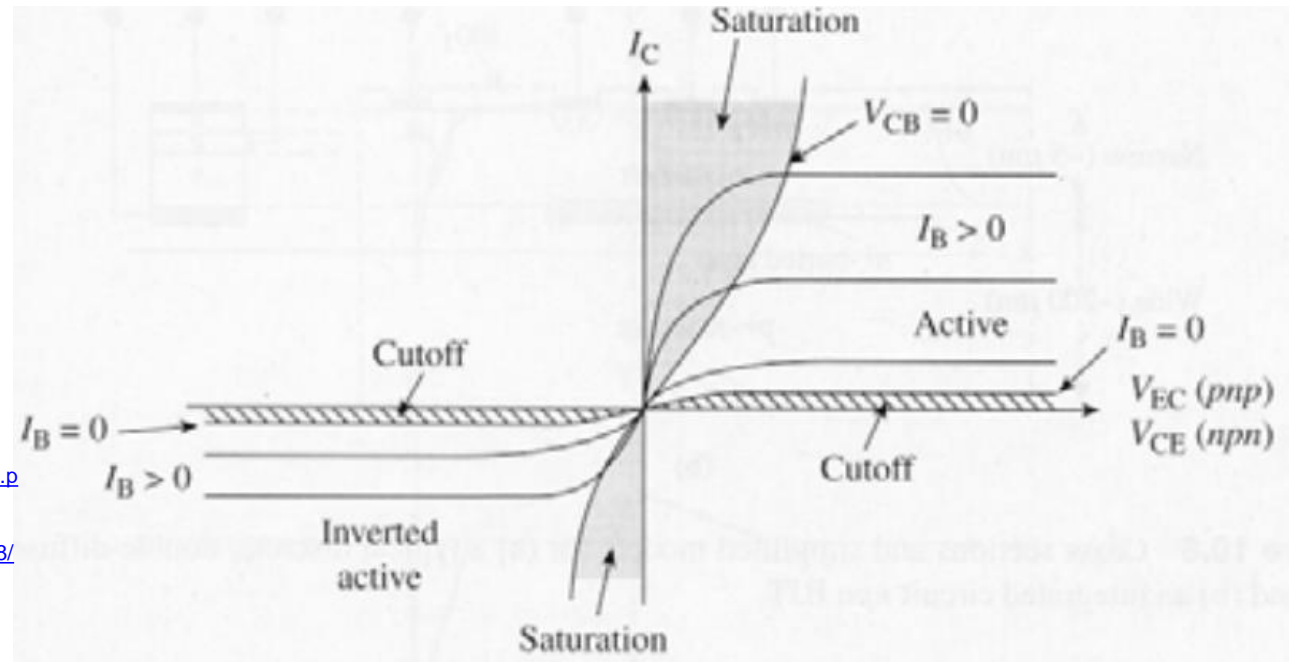


# Διπολικό τρανζίστορ – χαρακτηριστική I-V



## Τεταρτημώρια λειτουργίας τρανζίστορ

Πηγή: Principles of Semiconductor Devices, B. Van Zeghbroeck, 2011, Boulder, December 2004  
[http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/gif/fig5\\_3\\_2.gif](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/gif/fig5_3_2.gif)  
[http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/ch5\\_3.htm](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/ch5_3.htm)



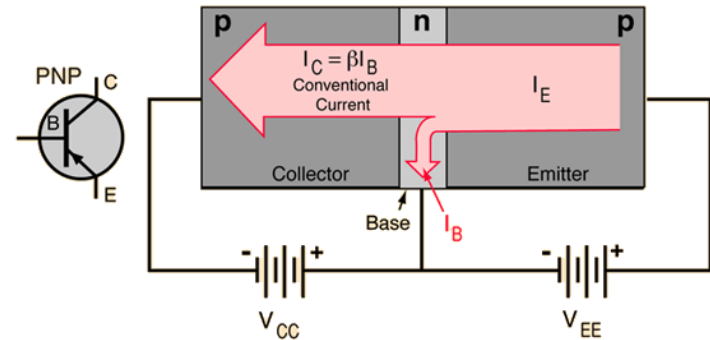
Περιοχές και τρόποι λειτουργίας ειδών τρανζίστορ.

Πηγή: Berkeley, <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee130/sp03/lecture/lecture15.pdf>  
<http://i.stack.imgur.com/d4mPt.png>  
<http://electronics.stackexchange.com/questions/85618/why-do-we-assume-vgs-vth-and-vds0-for-a-mosfet-in-cutoff-and-vce0-for-a-bjt-i>



# Ενίσχυση τάσης

το ρεύμα (μετατόπισης)  
στην ανάστροφα πολωμένη  
- με μεγάλη τάση - επαφή  
συλλέκτη εξαρτάται από τον  
αριθμό των φορέων που  
προμηθεύει (ρεύμα  
διάχυσης) η ορθά  
πολωμένη, με χαμηλότερη  
τάση, επαφή εκπομπού  
(συνδεσμολογία κοινής  
βάσης)



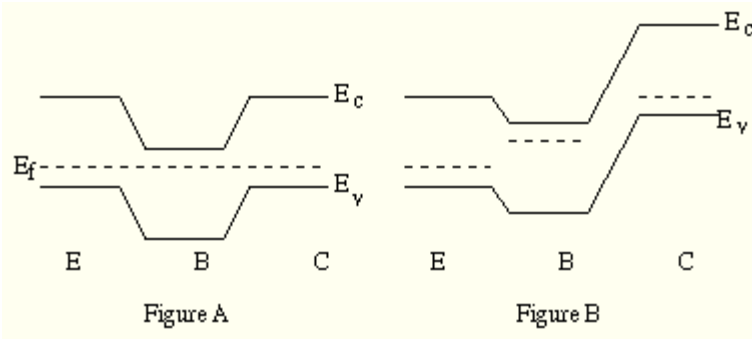
Απεικόνιση ροών ρευμάτων σε ένα τρανζίστορ pnp.

Πηγή: HyperPhysics, R Nave Georgia State University  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/imgsol/tran4.gif>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/trans.html>



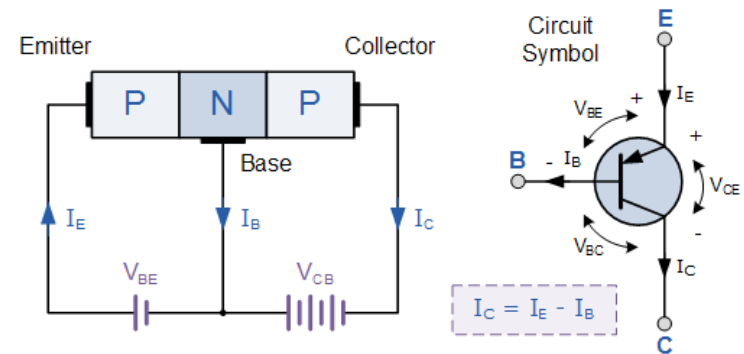


# Ενίσχυση τάσης



Διαγράμματα ενεργειακών Ζωνών σε τρανζίστορ.

Πηγή: The Ohio State University, 1996 –  
<http://www2.ece.ohio-state.edu/~roblin/test432/bjt/testall.html>  
<http://www2.ece.ohio-state.edu/~roblin/test432/bjt/bjtband.gif>



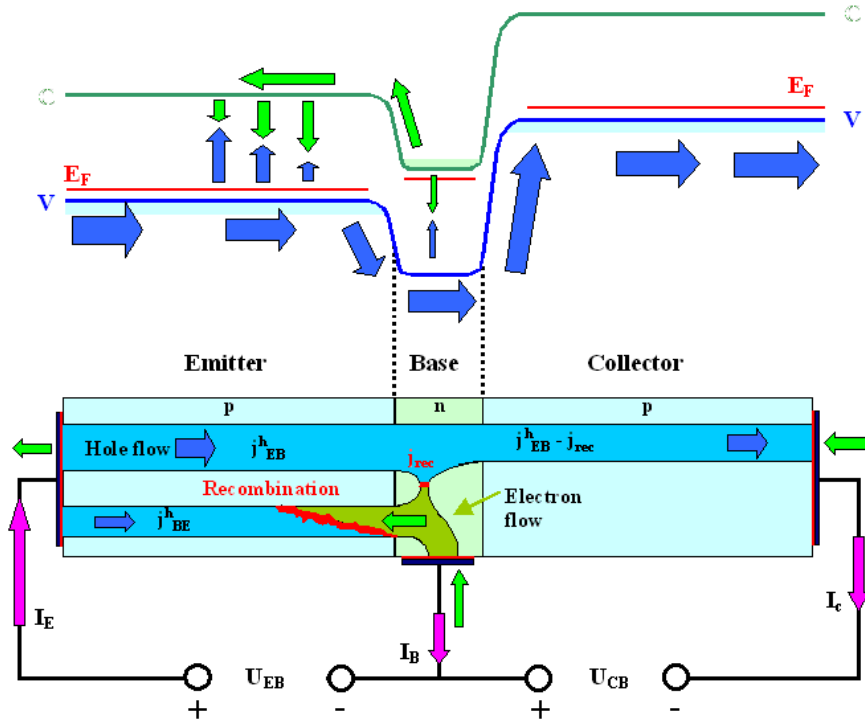
Απεικόνιση ροών ρευμάτων σε τρανζίστορ pnp.

Πηγή: SJB Institute of Technology - <http://www.sjbit.edu.in/app/course-material/CSE/III/ELECTRONIC%20CIRCUITS%20%5B10CS32%5D/CSE-III-ELECTRONIC%20CIRCUITS%20%5B10CS32%5D-NOTES.pdf>  
<https://bjttransistor.files.wordpress.com/2012/07/11.gif>  
<https://bjttransistor.wordpress.com/>

- επαφή συλλέκτη ανάστροφα πολωμένη - με μεγάλη τάση
- επαφή εκπομπού ορθά πολωμένη, με χαμηλότερη τάση, (συνδεσμολογία κοινής βάσης)



# Ροή φορέων σε τρανζίστορ p-n-p

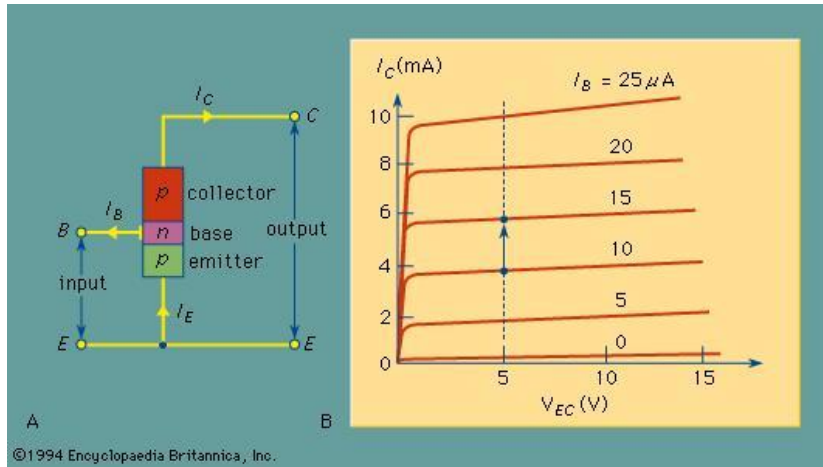


Απεικόνιση ροών ρευμάτων σε τρανζίστορ pnp.

Πηγή: Faculty of Engineering at Kiel University, Germany - H. Föll  
 (Semiconductor - Script) [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi\\_en/kap\\_3/backbone/r3\\_4\\_2.pdf](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_3/backbone/r3_4_2.pdf)  
[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi\\_en/kap\\_3/illustr/bip\\_transistor1.gif](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_3/illustr/bip_transistor1.gif)  
[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi\\_en/kap\\_3/backbone/r3\\_4\\_2.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_3/backbone/r3_4_2.html)

- Αν η βάση είναι στενή,  $W_B \ll L_p$ , η ανασύνδεση στη βάση είναι μικρή και το ρεύμα δεν μειώνεται,  $I_C \approx I_E$
- $I_B \ll I_C$ , ενίσχυση ρεύματος (με συνδεσμολογία κοινού εκπομπού)

# Ενίσχυση ρεύματος (συνδεσμολογία κοινού εκπομπού)



Ρεύμα συλλέκτη σε σχέση με την επιβολή τάσης σε εκπομπό-συλλέκτη.

Πηγή: Encyclopædia Britannica, Inc - Semiconductor device  
<http://media-2.web.britannica.com/eb-media/11/211-004-7DF20268.jpg>  
<http://www.britannica.com/technology/semiconductor-device/images-videos/Common-emitter-configuration-of-a-p-n-p-transistor-output/143>

- Η βάση είναι ουδέτερη – έχει ίσο αριθμό ηλεκτρονίων & οπών
- Ο χρόνος διέλευσης των οπών  $\tau_B$  είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο ζωής  $\tau_p$
- Για ένα ηλεκτρόνιο του  $I_B$  περνάνε  $\tau_p / \tau_B$  οπές του  $I_C$
- $I_C / I_B = \tau_p / \tau_B = \beta$



# Υπολογισμός κέρδους ρεύματος

- Το ρεύμα διάχυσης είναι

$$I_p(x) = J_p(x)A = eAD_p d\Delta p(x)/dx$$

όπου  $\Delta p(x) = C_1 \exp(x/L_p) + C_2(\exp(-x/L_p))$  είναι η λύση της εξίσωσης διάχυσης ( $d^2\Delta p/dx^2 = \Delta p/L_p^2$ )

- Προσδιορίζουμε τα  $C_1, C_2$  από τις οριακές συνθήκες

$$\Delta p(0) = C_1 + C_2 \quad \text{και} \quad \Delta p(W) = C_1 \exp(W/L_p) + C_2(\exp(-W/L_p))$$

επομένως

$$C_1 = \frac{\Delta p(W) - \Delta p(0) \exp(-W/L)}{\exp(W/L) - \exp(-W/L)} \quad C_2 = \frac{\Delta p(0) \exp(W/L) - \Delta p(W)}{\exp(W/L) - \exp(-W/L)}$$

Η λύση της εξίσωσης διάχυσης είναι

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) \frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L}\right)} - \Delta p(W) \frac{\sinh\left(\frac{x}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L}\right)}$$



- λύση: 
$$\Delta p(x) = \Delta p(0) \frac{\sinh(\frac{W-x}{L})}{\sinh(\frac{W}{L})} - \Delta p(W) \frac{\sinh(\frac{x}{L})}{\sinh(\frac{W}{L})}$$

- Το ρεύμα είναι

$$I_p(x) = \frac{eDA}{L} \left[ \Delta p(0) \frac{\cosh(\frac{W-x}{L})}{\sinh(\frac{W}{L})} - \Delta p(W) \frac{\cosh(\frac{x}{L})}{\sinh(\frac{W}{L})} \right]$$

Αν  $\Delta p(W)=0$ , ο δεύτερος όρος μηδενίζεται

- Για  $W \gg L \Rightarrow \sinh(W/L) \approx \exp(W/L)/2$

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) \exp(-x/L) \text{ (εξίσωση διάχυσης σε άπειρο μήκος)}$$

- Για  $W \ll L$  ("στενή βάση")

[επειδή  $\sinh(x) = x + (x^3/3!) + (x^5/5!) + \dots \approx x$ ]

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) [1 - (x/W)]$$



# απόδοση εκπομπού $\gamma$ :

- ρεύμα εκπομπού  $I_E = I_{Es}[\exp(eV_{BE}/kT)-1]$

όπου 
$$I_{Es} = e n_{i0}^2 A \left( \frac{1}{B} + \frac{1}{E} \right) = I_{pE} + I_{nE}$$

- απόδοση εκπομπού 
$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{Es}} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{1}{B} + \frac{1}{E}} = \frac{1}{1 + \frac{B}{E}}$$

$B = (N_{DB} L_{pB} / D_{pB}) \tanh(W_B / L_{pB})$  έγχυση οπών στη βάση

$E = (N_{AE} L_{nE} / D_{nE}) \tanh(W_E / L_{nE})$  έγχυση ηλεκτρονίων στον εκπομπό

- Αν η βάση είναι στενή ( $W_B \ll L$ ),

$B = (N_{DB} W_B / D_{pB})$  και γενικά 
$$G_B = \int_0^W \frac{N_{DB}}{D_{pB}} dx \quad (\text{αριθμός Gummel})$$

$E = (N_{AE} W_E / D_{nE})$  ή 
$$G_E = \int \frac{N_{AE}}{D_{nE}} dx$$



# παράγοντας μεταφοράς $a_T$

- Αγνοούμε το ρεύμα μετατόπισης των φορέων μειοψηφίας - Υπάρχει μόνο το ρεύμα διάχυσης

$$a_T = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} = \frac{d\Delta p(x)/dx|_{x=W}}{d\Delta p(x)/dx|_{x=0}} = \frac{1}{\cosh(W_B / L_{pB})}$$

- Για στενή βάση  $W_B \ll L$ , επειδή  $\cosh(x) = 1 + (x^2/2!) + (x^4/4!) + \dots$

$$a_T \approx \frac{1}{1 + \frac{W_B^2}{2L_{pB}^2}} \approx 1 - \frac{W_B^2}{2L_{pB}^2}$$

- φαινόμενο *Early* : η διαμόρφωση του πλάτους της βάσης με την τάση πόλωσης

$$W_B = \ell_B - \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{CB}}{eN_{DB}}}$$



# Σημείωμα Αναφοράς

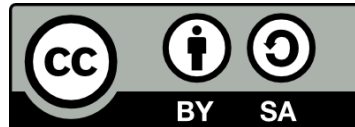
Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.  
«Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία – Διατάξεις» Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015.  
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS463>.





# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Καρανάσιος Νικόλαος  
Θεσσαλονίκη, 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ