ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωχωρικές Τεχνολογίες»

Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας

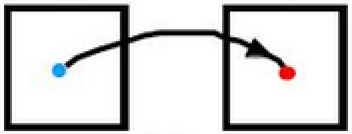
Εισηγητής
Αναστάσιος Κεσίδης

Σημειακή επεξεργασία και μετασχηματισμοί

Κατηγορίες μετασχηματισμού εικόνων

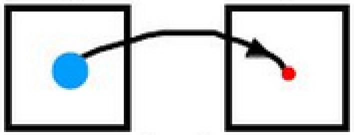
- Σημειακοί μετασχηματισμοί

  Η τιμή ενός pixel στην τελική εικόνα εξαρτάται μόνο από την τιμή του pixel **στην ίδια θέση** στην αρχική εικόνα



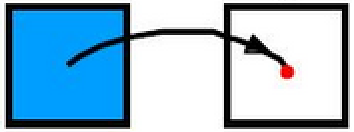
- Τοπικοί μετασχηματισμοί

  Η τιμή ενός pixel στην τελική εικόνα εξαρτάται από τις τιμές των pixel σε μια **γειτονία** της αρχικής εικόνας



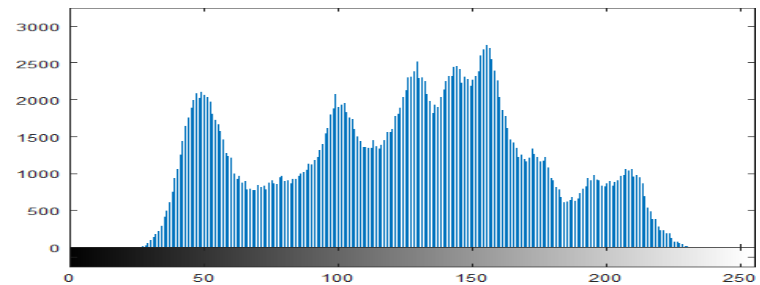
- Συνολικοί μετασχηματισμοί

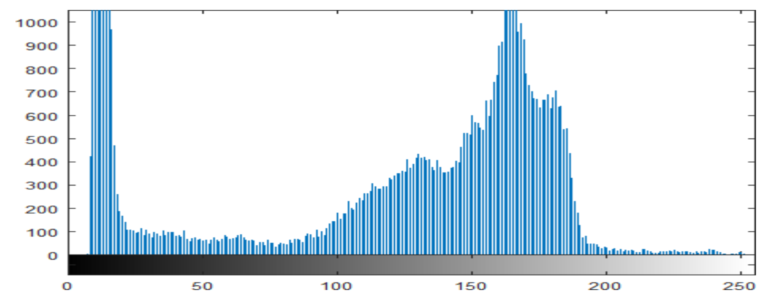
  Η τιμή ενός pixel στην τελική εικόνα εξαρτάται από τις τιμές **όλων** των pixel της αρχικής εικόνας

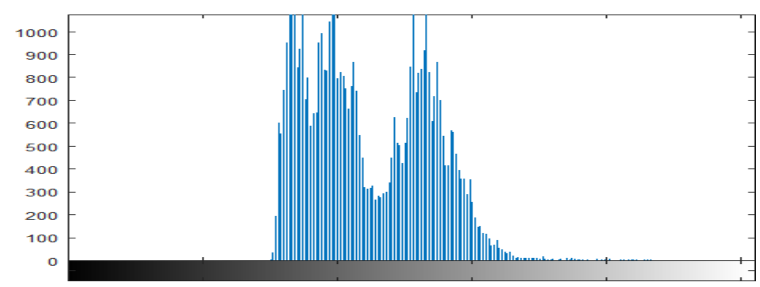


Ιστόγραμμα

- Κατανομή του πλήθους των pixels της εικόνας ανά τιμή φωτεινότητας.

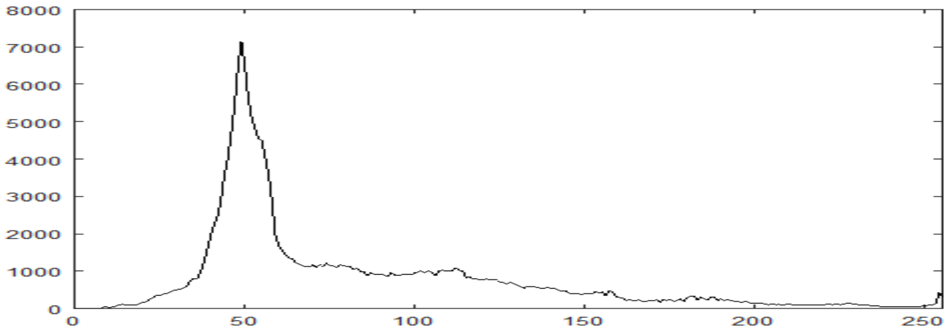


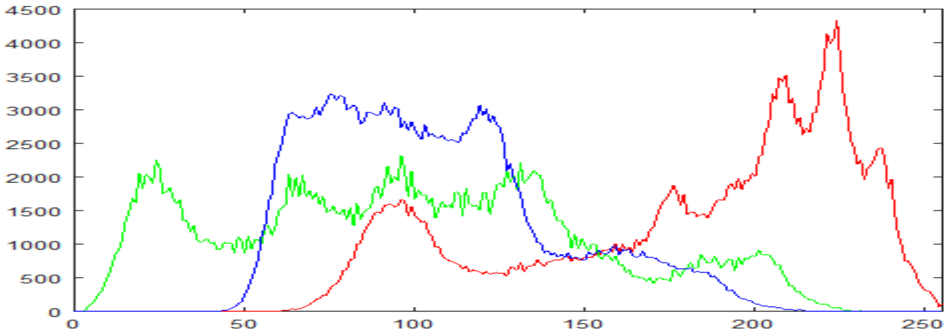




Ιστόγραμμα

- Οι κορυφές στις grayscale εικόνες αντιστοιχούν σε τιμές gray με μεγάλη πυκνότητα τιμών.
- Ομοίως και στις RGB εικόνες για κάθε χρωματική μπάντα ξεχωριστά.





Ιστόγραμμα

Για μια grayscale εικόνα I διαστάσεων $(R \times C)$ με graylevel τιμές

$$I(u, v) \in [0\,, L - 1]$$

η i-οστή τιμή του ιστογράμματος είναι

$$h(i) = \#\{(u, v) \mid I(u, v) = i\} \text{ για } 0 \le i \le L - 1$$

Είναι

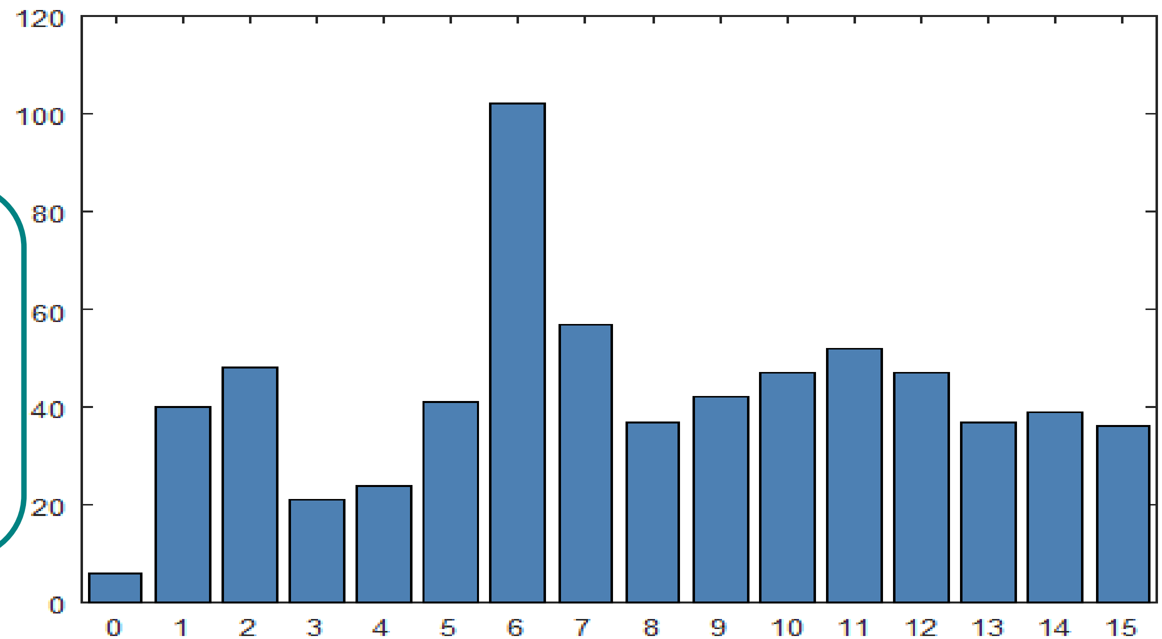
$$\sum_{i=0}^{L-1} h(i) = N = R \cdot C$$

Παράδειγμα
4-bit grayscale εικόνα

Διαστάσεις: $R \times C = 26 \times 26$ pixels
Σύνολο pixels: $N = R \cdot C = 676$

Είναι $L = 2^4 = 16$

$h(6) = 102$



$h(i)$	6	40	48	21	24	41	102	57	37	42	47	52	47	37	39	36

Ιδιότητες ιστογράμματος

- Παρέχει **στατιστική** πληροφορία χωρίς κάποια ένδειξη για την **θέση** των pixels που έχουν την εκάστοτε grayscale τιμή

- Σε μια **σκούρα** εικόνα, η πληθώρα των pixels βρίσκεται στα αριστερά του ιστογράμματος

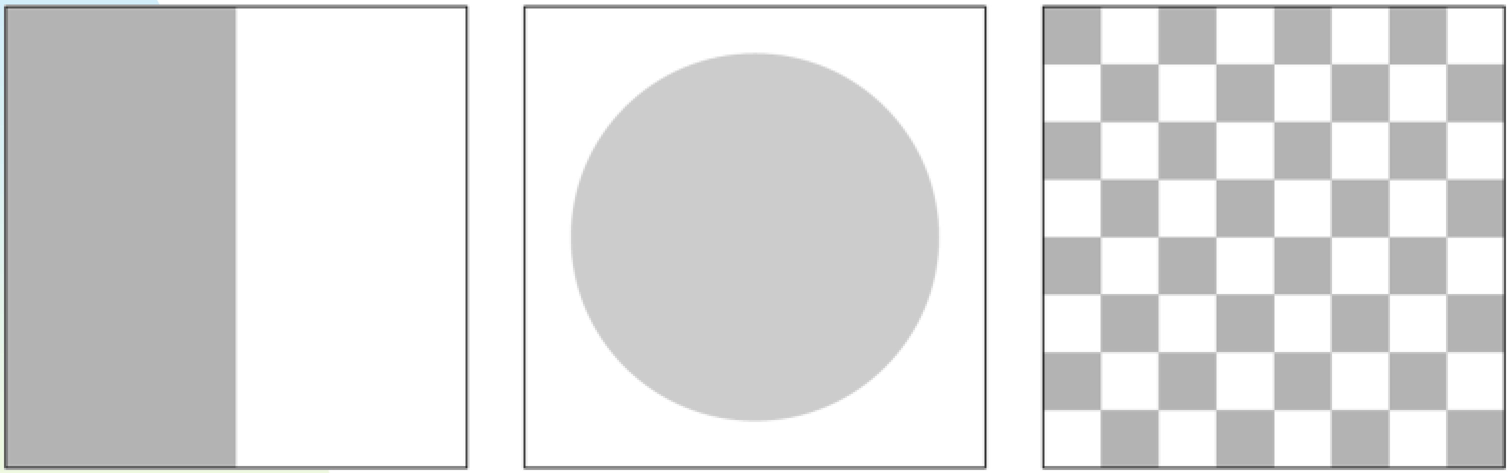
- Σε μια **φωτεινή** εικόνα, η πληθώρα των pixels βρίσκεται στα δεξιά του ιστογράμματος

- Μια εικόνα με καλή **αντίθεση**, τα pixels εκτείνονται σε όλο το φάσμα του ιστογράμματος

Ιδιότητες ιστογράμματος

- Διαφορετικές εικόνες μπορεί να έχουν το ίδιο ιστόγραμμα

  Π.χ. εικόνες με **ίσο** αριθμό gray και λευκών pixels, αλλά με διαφορετική **διάταξη**



- Μια εικόνα **δεν** μπορεί να ανακτηθεί από το ιστόγραμμά της (η χωρική πληροφορία έχει χαθεί)

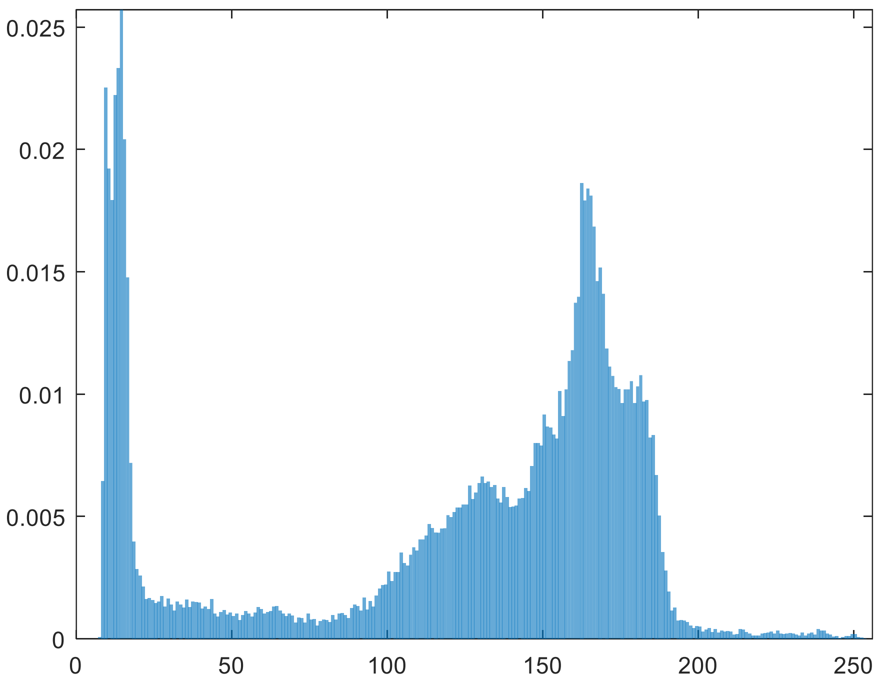
Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (**probability density function - pdf**) grayscale εικόνας I διαστάσεων $(R \times C)$

$$p(i) = \frac{h(i)}{N} \quad \text{με } 0 \leq i \leq L-1$$

όπου

$$N = R \cdot C = \sum_{i=0}^{L-1} h(i)$$



Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

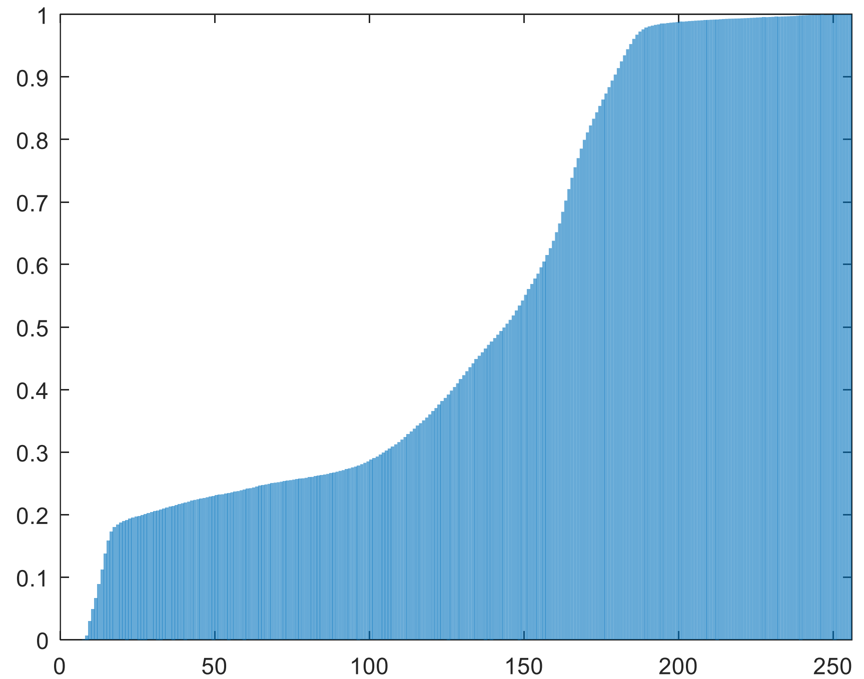
- **Ιδιότητες** της pdf
  - Η $p(i)$ αντιστοιχεί στο **ποσοστό** των pixel της εικόνας που έχουν graylevel τιμή i.
  - Εάν επιλεγεί ένα pixel της εικόνας στην τύχη, η $p(i)$ δίνει την **πιθανότητα** να έχει graylevel τιμή i.
  - Το **άθροισμα** όλων των τιμών $p(i)$ για $0 \leq i \leq L-1$ ισούται με 1.
  - Η $p(i)$ δίνει το **κανονικοποιημένο** ιστόγραμμα της grayscale εικόνας.

Αθροιστική συνάρτηση κατανομής

- Αθροιστική συνάρτηση κατανομής (**cumulative probability function - cdf**) grayscale εικόνας I διαστάσεων $(R \times C)$

$$P(i) = \sum_{k=0}^{i} p(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{i} h(k) \quad \text{με } 0 \leq i \leq L-1 \text{ και } N = R \cdot C = \sum_{i=0}^{L-1} h(i)$$

- **Ιδιότητες** της cdf
  - Η $P(i)$ αντιστοιχεί στο **ποσοστό** των pixel της εικόνας που έχουν graylevel τιμή **μικρότερη ή ίση** με i.
  - Εάν επιλεγεί ένα pixel της εικόνας στην τύχη, η $P(i)$ δίνει την **πιθανότητα** να έχει graylevel τιμή **μικρότερη ή ίση** με i.



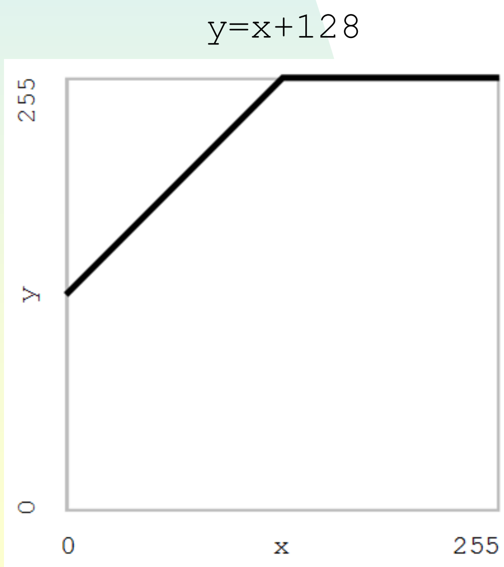
Αριθμητικές πράξεις

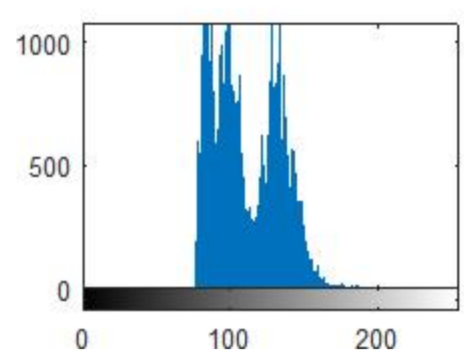
- **Πρόσθεση** (ή αφαίρεση) μιας σταθεράς στην τιμή κάθε pixel

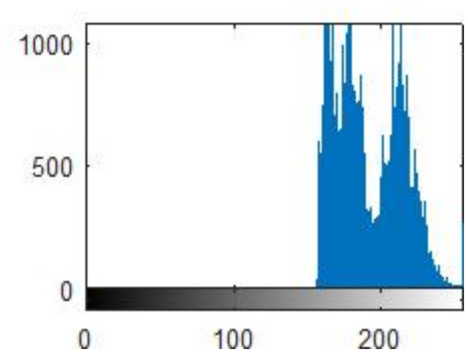
$$y = x + c$$

Οι τελικές τιμές **αποκόπτονται** στο εύρος τιμών $[0..255]$

$$y = \begin{cases} 255 & \text{εάν } y > 255 \\ 0 & \text{εάν } y < 0 \end{cases}$$



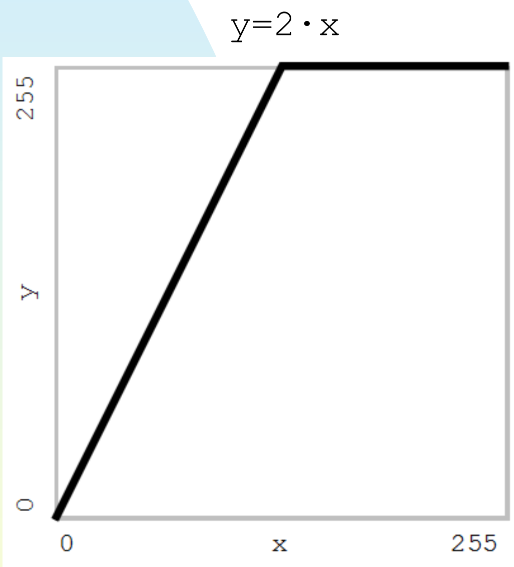


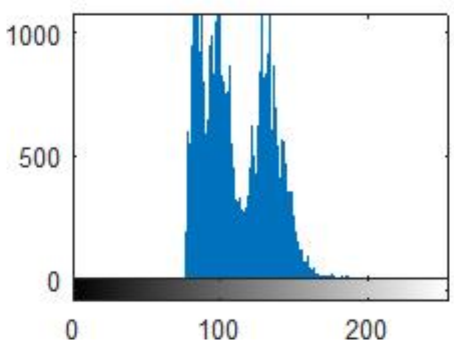


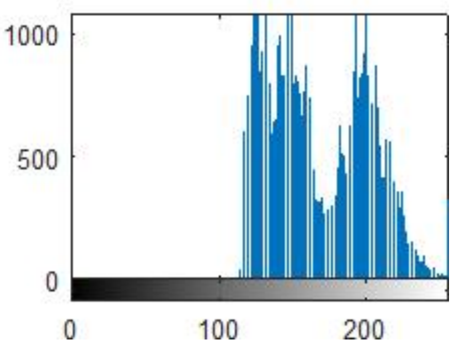
Αριθμητικές πράξεις

- **Πολλαπλασιασμός** (ή διαίρεση) κάθε pixel με μια σταθερά

$$y = \alpha x$$



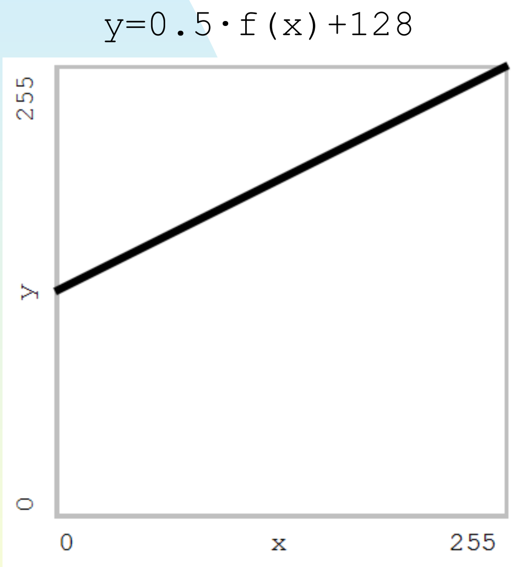


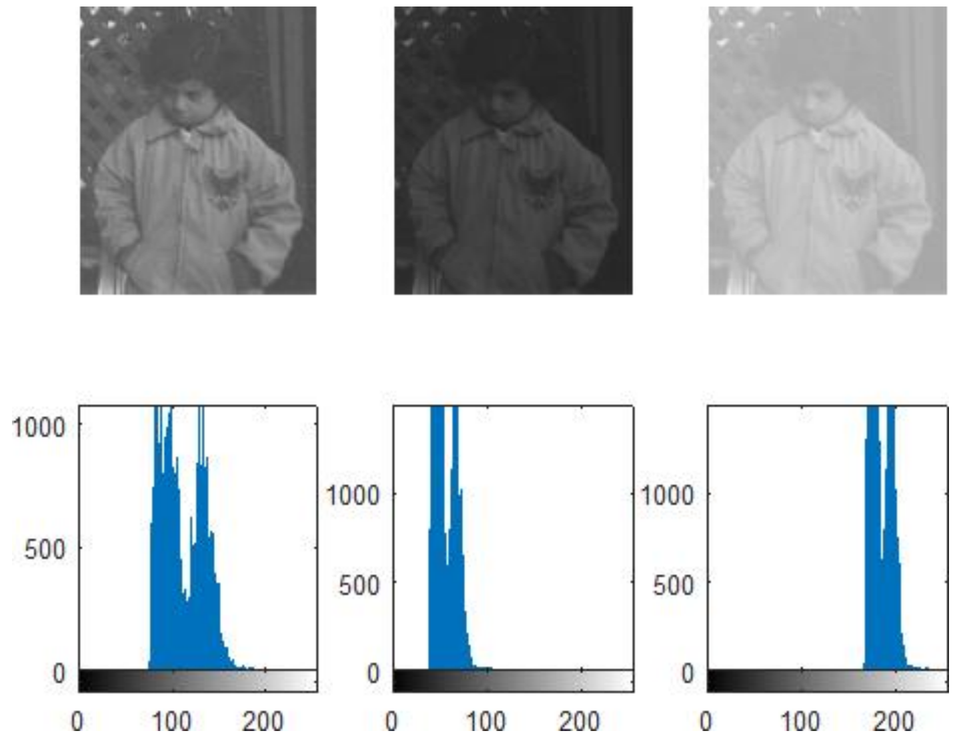


Αριθμητικές πράξεις

- **Γραμμικός μετασχηματισμός** για κάθε pixel

$$y = ax + b$$

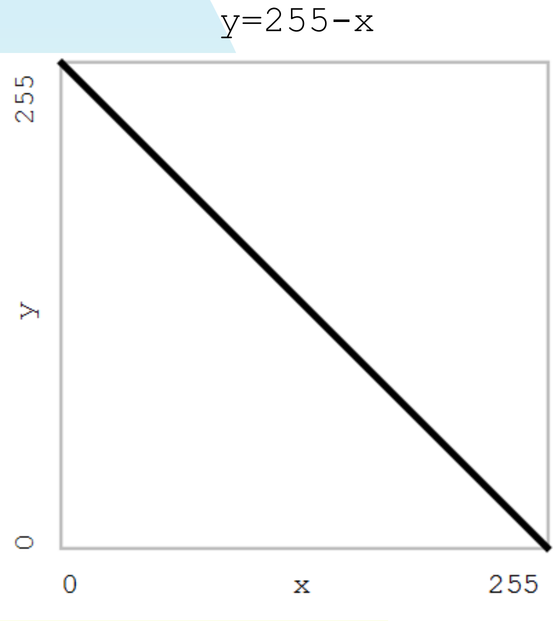


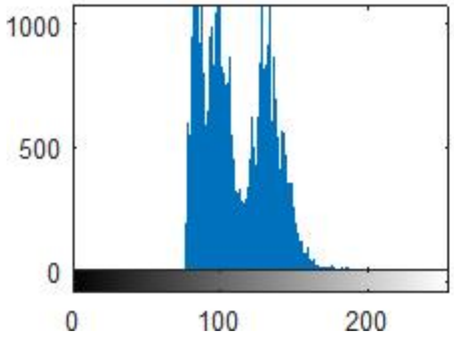


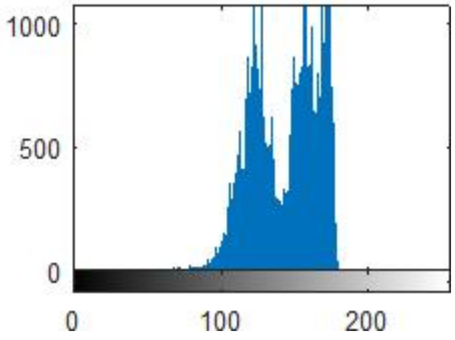
Αριθμητικές πράξεις

- **Συμπλήρωμα** εικόνας

$$y = 255 - x$$





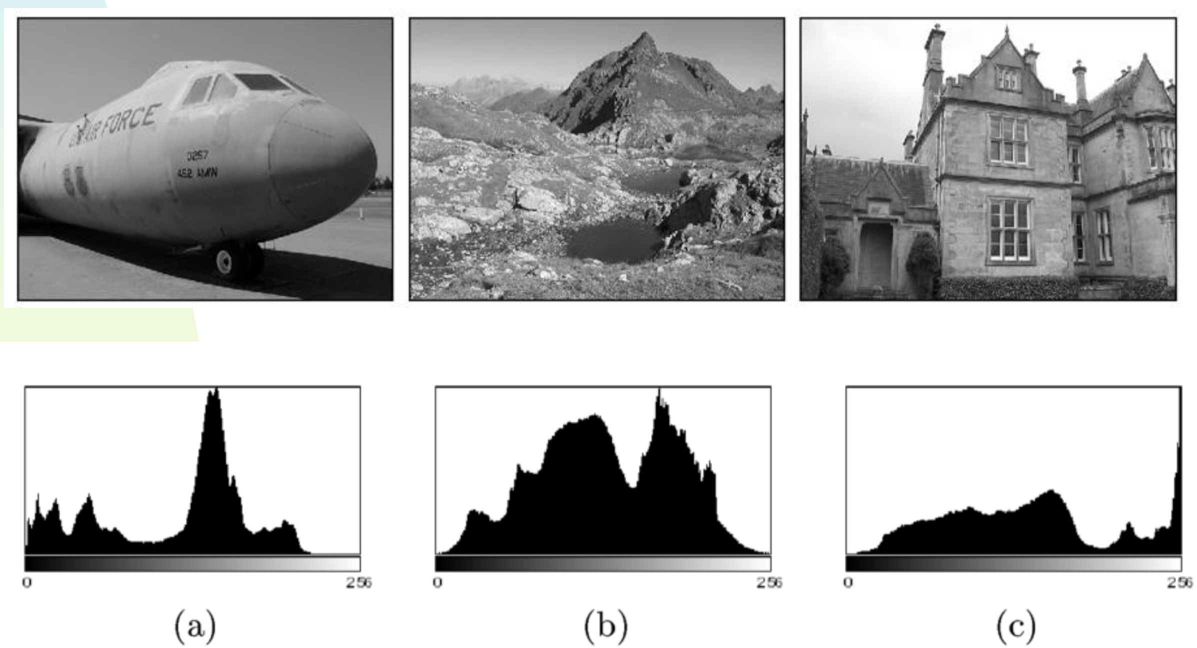


Φωτεινότητα εικόνας

- Η φωτεινότητα της εικόνας είναι η **μέση φωτεινότητα** όλων των pixels της εικόνας

$$B(I) = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^{R} \sum_{u=1}^{C} I(u, v) \quad \text{όπου } N = R \cdot C$$

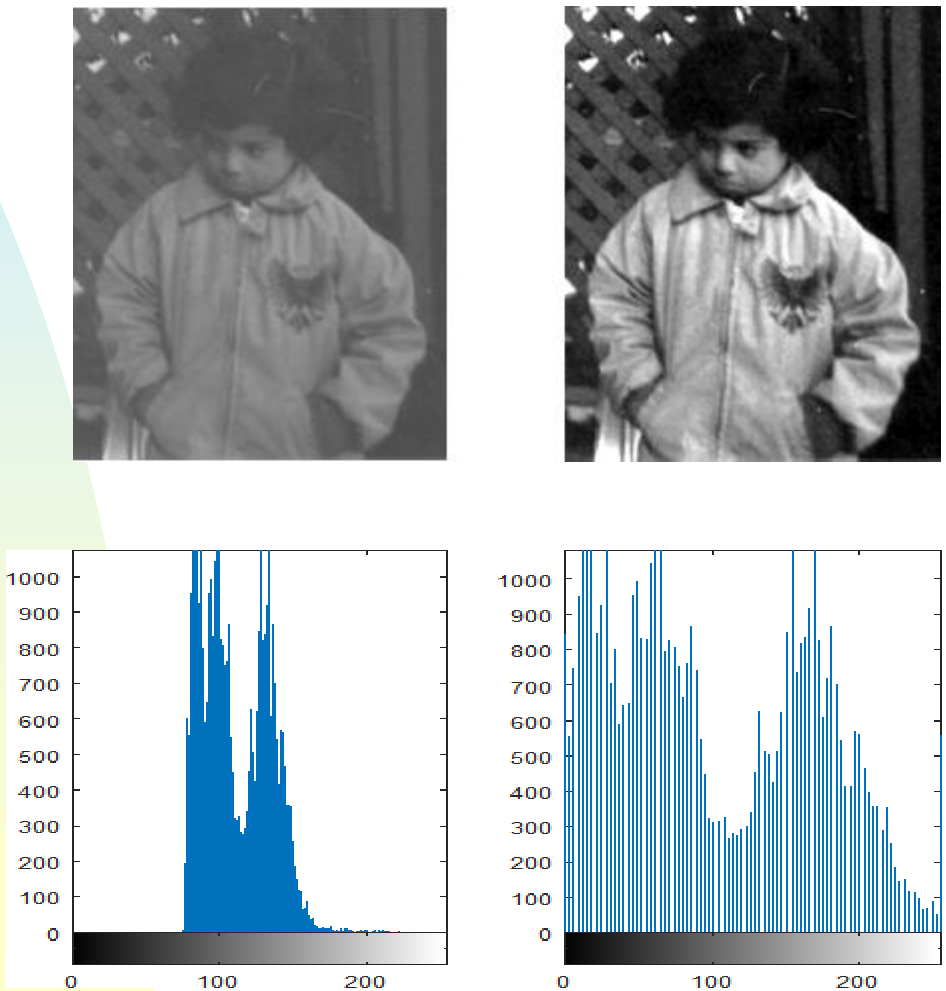
- Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της έκθεσης της εικόνας



Υποέκθεση | Σωστή έκθεση | Υπερέκθεση

Αντίθεση εικόνας

- Εκφράζεται από το **εύρος** των τιμών grayscale της εικόνας



Αντίθεση εικόνας

- Υπολογισμός αντίθεσης
  - Τύπος **Michelson**

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

όπου I_{min} και I_{max} αντιστοιχούν στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή φωτεινότητας της εικόνας.

  - **Root Mean Square (RMS)**

$$C = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{v=1}^{R}\sum_{u=1}^{C}(I(u,v) - B)^2}$$

όπου B είναι η φωτεινότητα της εικόνας και $N = R \cdot C$

Μετασχηματισμός γάμα

- Μετασχηματισμός Γάμα **(gamma correction)**

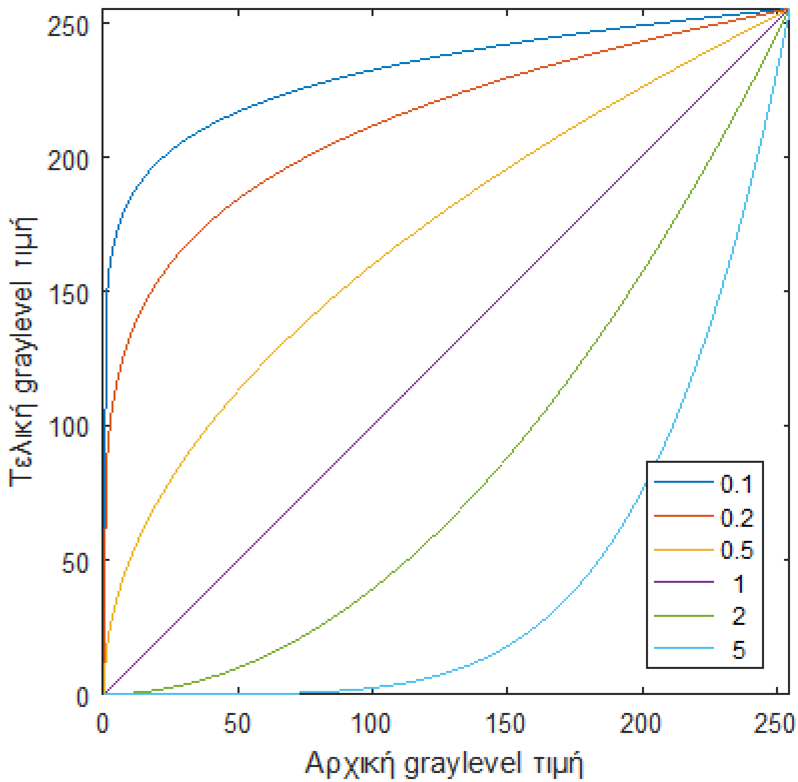
$$y = x^{\gamma} \quad \text{για } x \in [0..1] \text{ και } \gamma > 0$$

ή

$$y = 255 \cdot (x/255)^{\gamma} \quad \text{για } x \in [0..255] \text{ και } \gamma > 0$$

- **Ιδιότητες**
  - Για $\gamma < 1$ βελτιώνει τις σκοτεινές περιοχές της εικόνας
  - Στο διάστημα $[0..1]$ η συνάρτηση είναι συνεχής και αύξουσα και συνεπώς μπορεί να αντιστραφεί

$$x = y^{1/\gamma}$$

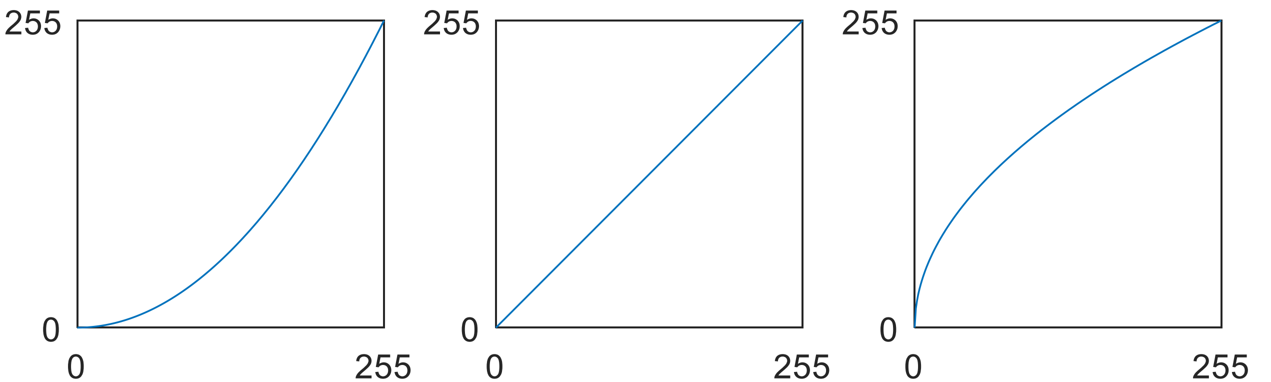


Μετασχηματισμός γάμα

- Παράδειγμα

Αρχική εικόνα

γ=2 γ=1 γ=0.5



Αυτόματη ρύθμιση αντίθεσης

- **Auto contrast**

Διαδικασία μέσω της οποίας οι τιμές των pixel της εικόνας διευρύνονται σε όλο το διαθέσιμο φάσμα τιμών φωτεινότητας.

$$y = x_{min} + (x - x_{low}) \cdot \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{high} - x_{low}}$$

όπου

x_{low} , x_{high} δίνουν το εύρος των τιμών φωτεινότητας της **εικόνας**

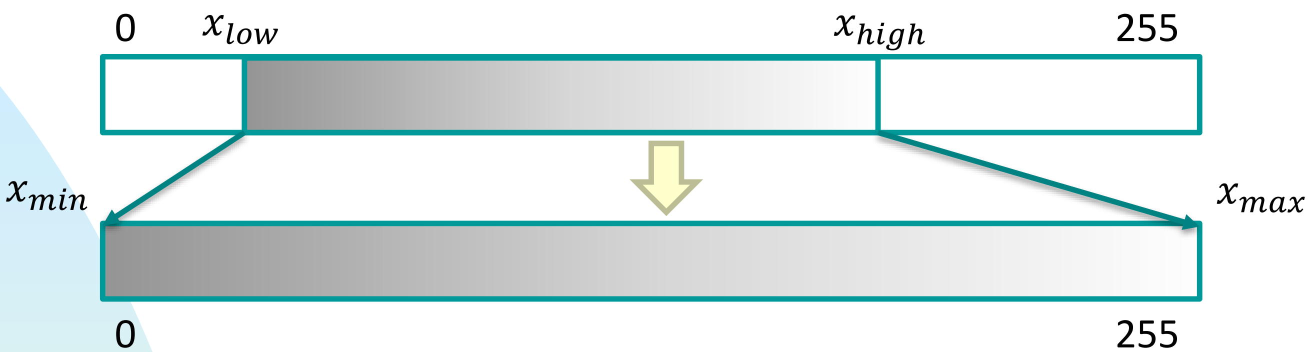
x_{min} , x_{max} δίνουν το εύρος των **διαθέσιμων** τιμών φωτεινότητας

- Θεωρείται ότι $x_{low} \neq x_{high}$ δηλαδή ότι η εικόνα περιέχει τουλάχιστον δύο διαφορετικές τιμές φωτεινότητας.
- Για συνήθεις τιμές $x_{min} = 0$ και $x_{max} = 255$ η σχέση απλοποιείται σε

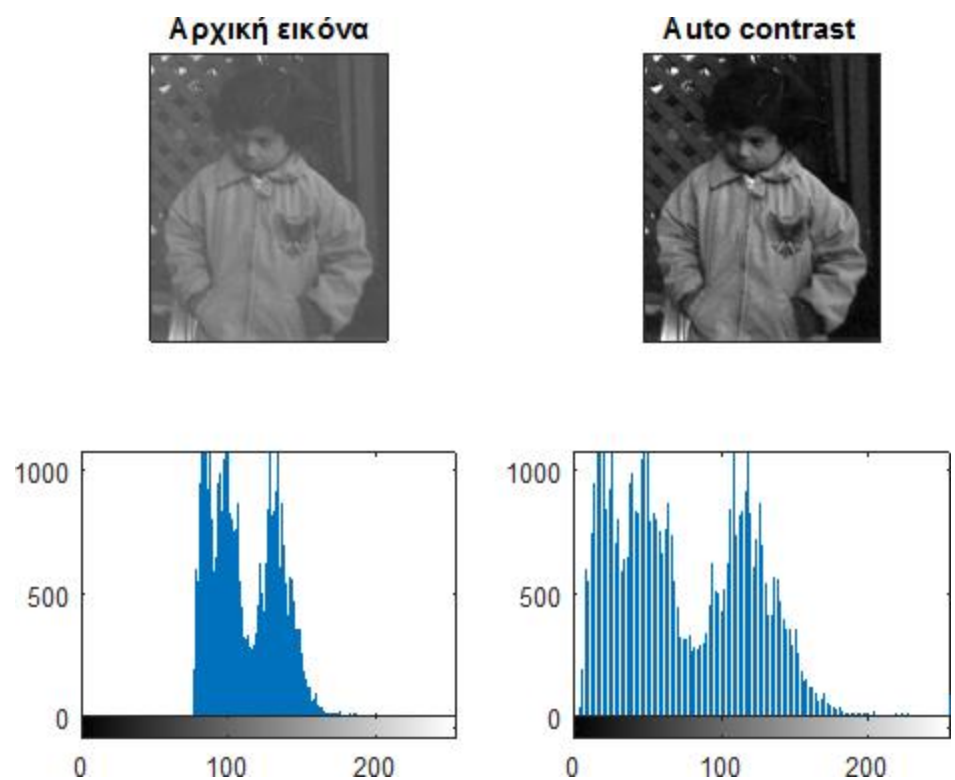
$$y = (x - x_{low}) \cdot \frac{255}{x_{high} - x_{low}}$$

Αυτόματη ρύθμιση αντίθεσης

- **Auto contrast**



- **Παρατηρήσεις**
  - Το εύρος $[x_{min} \dots x_{max}]$ μπορεί να είναι οποιοδήποτε διάστημα graylevel τιμών
  - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μείωση της αντίθεσης της εικόνας



Αυτόματη ρύθμιση αντίθεσης

- **Πρόβλημα**

  Η μέθοδος μπορεί να επηρεαστεί από ακραίες μικρές ή μεγάλες τιμές graylevel, οι οποίες επηρεάζουν τις τιμές x_{low} , x_{high} αλλά δεν είναι αντιπροσωπευτικές της εικόνας.

  Π.χ. εάν υπάρχει ένα μόνο pixel στην εικόνα με graylevel τιμή 0 και ένα ακόμη με τιμή 255 τότε η μέθοδος δεν έχει αποτέλεσμα.

- **Προσέγγιση**

  - Ορίζονται δύο κατώφλια αποκοπής, c_{low} και c_{high} για τις μικρές και τις μεγάλες τιμές του ιστογράμματος, αντίστοιχα.
  - Κατά τον γραμμικό μετασχηματισμό δεν λαμβάνονται υπόψη τιμές μικρότερες από c_{low} και μεγαλύτερες από c_{high}, αντίστοιχα.
  - Τα κατώφλια εξαρτώνται από το περιεχόμενο της εικόνας και μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής $H(i)$.

Αυτόματη ρύθμιση αντίθεσης

- **Τροποποιημένη μέθοδος auto contrast**

Το νέο εύρος τιμών $[\hat{x}_{low}, \hat{x}_{high}]$ είναι

Πλήθος pixels εικόνας

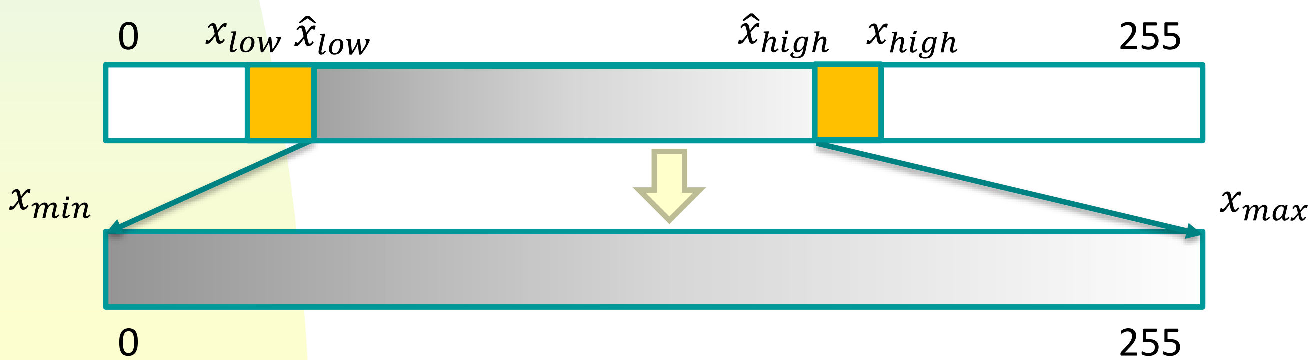
$$\hat{x}_{low} = min\{i \mid H(i) \geq N \cdot c_{low}\}$$

και

$$\hat{x}_{high} = max\{i \mid H(i) \leq N \cdot (1 - c_{high})\}$$

όπου

$$0 \leq c_{low}, c_{high} \leq 1 \quad \text{και} \quad 0 \leq c_{low} + c_{high} \leq 1$$



Αυτόματη ρύθμιση αντίθεσης

➢ **Παράδειγμα**

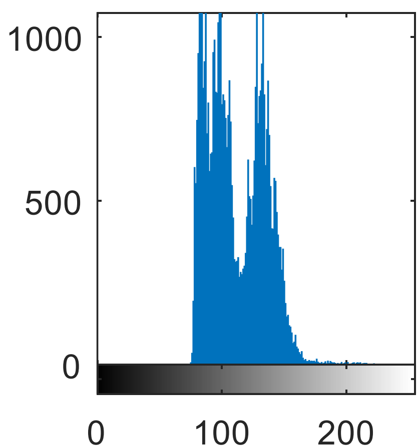
Αρχική εικόνα

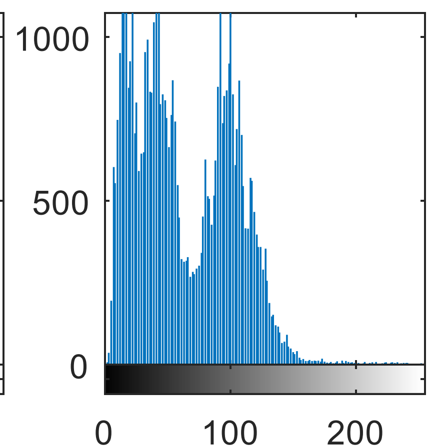
Auto contrast

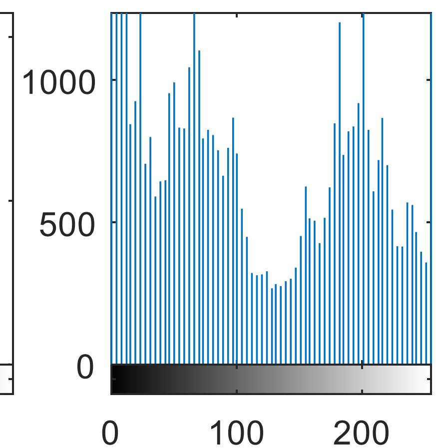
$c_{low} = c_{high} = 0$

Modified auto contrast

$c_{low} = c_{high} = 0.05$







Γραμμική τμηματική ρύθμιση αντίθεσης

- Εκφράζεται ως μια ακολουθία από $N + 1$ ζεύγη

  $$\langle a(0), b(0)\rangle, \langle a(1), b(1)\rangle, \ldots, \langle a(k), b(k)\rangle, \ldots, \langle a(N), b(N)\rangle$$

  όπου

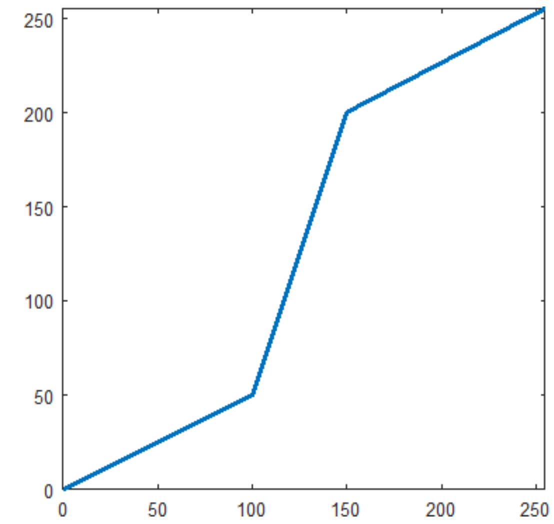
  $$0 \leq a(k), b(k) \leq L - 1$$

  με

  $$a(k) < a(k+1) \quad \text{και} \quad b(k) < b(k+1)$$

  - Το αρχικό και το τελικό σημείο είναι $\langle 0,0\rangle$ και $\langle L-1, L-1\rangle$, αντίστοιχα, όπου L το πλήθος των graylevel τιμών.
  - Ορίζονται συνολικά N ευθύγραμμα τμήματα

$N = 3$
$L = 255$
$\langle a, b\rangle = \langle 0,0\rangle, \langle 100,50\rangle, \langle 150,200\rangle, \langle 255,255\rangle$



Γραμμική τμηματική ρύθμιση αντίθεσης

- Ο μετασχηματισμός για τα pixel της αρχικής εικόνας που εμπίπτουν στο i-οστό ευθύγραμμο τμήμα είναι

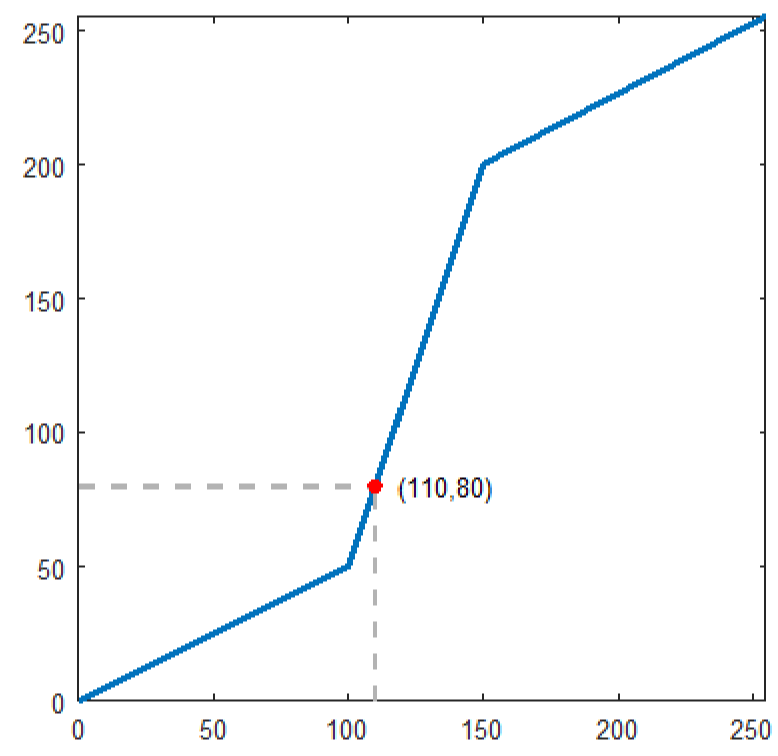
$$y = \frac{b(i) - b(i-1)}{a(i) - a(i-1)}(x - a(i-1)) + b(i-1)$$

για

$$1 \leq i \leq N$$

$N = 3$
$L = 255$
$\langle a, b \rangle = \langle 0,0 \rangle, \langle 100,50 \rangle, \langle 150,200 \rangle, \langle 255,255 \rangle$

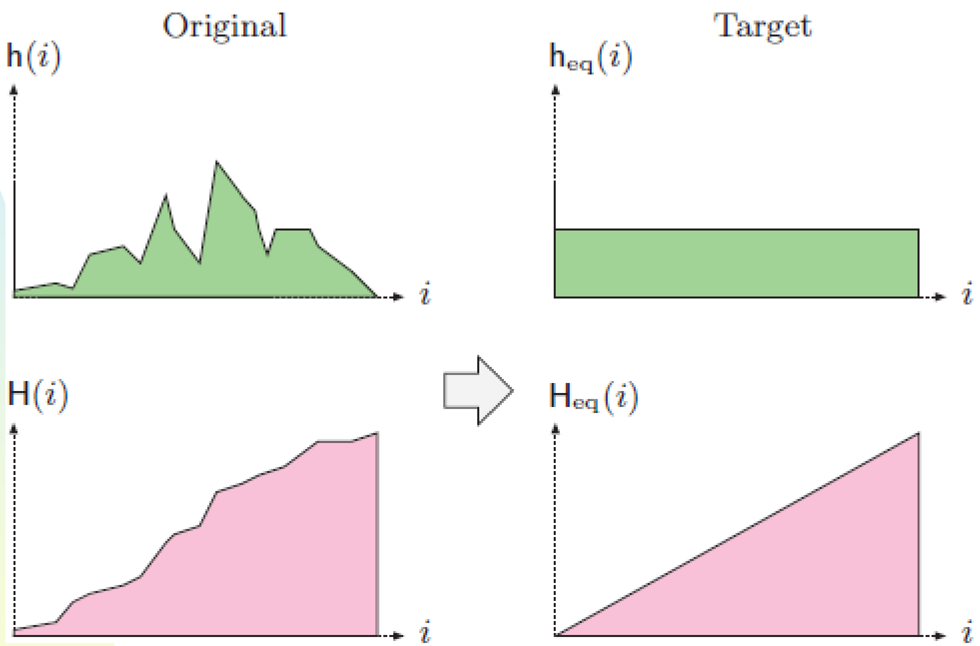
Για $x = 110$ είναι $y = 80$



Ισοστάθμιση ιστογράμματος

- **Περιγραφή**

  Σημειακός μετασχηματισμός με σκοπό το ιστόγραμμα της τελικής εικόνας να προσεγγίζει την **ομοιόμορφη** (uniform) κατανομή



- **Χρήση**
  - Αυτοματοποιημένη αύξηση αντίθεσης
  - Σύγκριση εικόνων μέσω ιστογράμματος

Ισοστάθμιση ιστογράμματος

Για μια grayscale εικόνα $I(u,v) \in [0\,, L-1]$ με τιμές ιστογράμματος $h(i)$ για $0 \le i \le L-1$, η i-οστή τιμή του **ισοσταθμισμένου** ιστογράμματος είναι

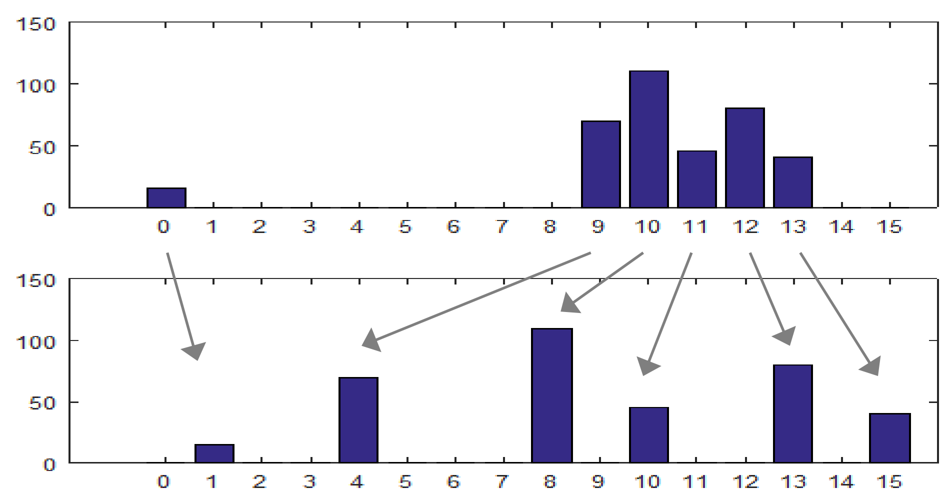
$$h_{eq}(i) = \left[H(i) \cdot \frac{L-1}{N} \right] = \left[\frac{h(0)+h(1)+\cdots+h(i)}{N}(L-1) \right] = P(i)(L-1)$$

όπου $H(i) = \sum_{k=0}^{i} h(i)$ και $P(i)$ η αθροιστική συνάρτηση κατανομής.

Το [ ] συμβολίζει την στρογγυλοποίηση στον πλησιέστερο ακέραιο

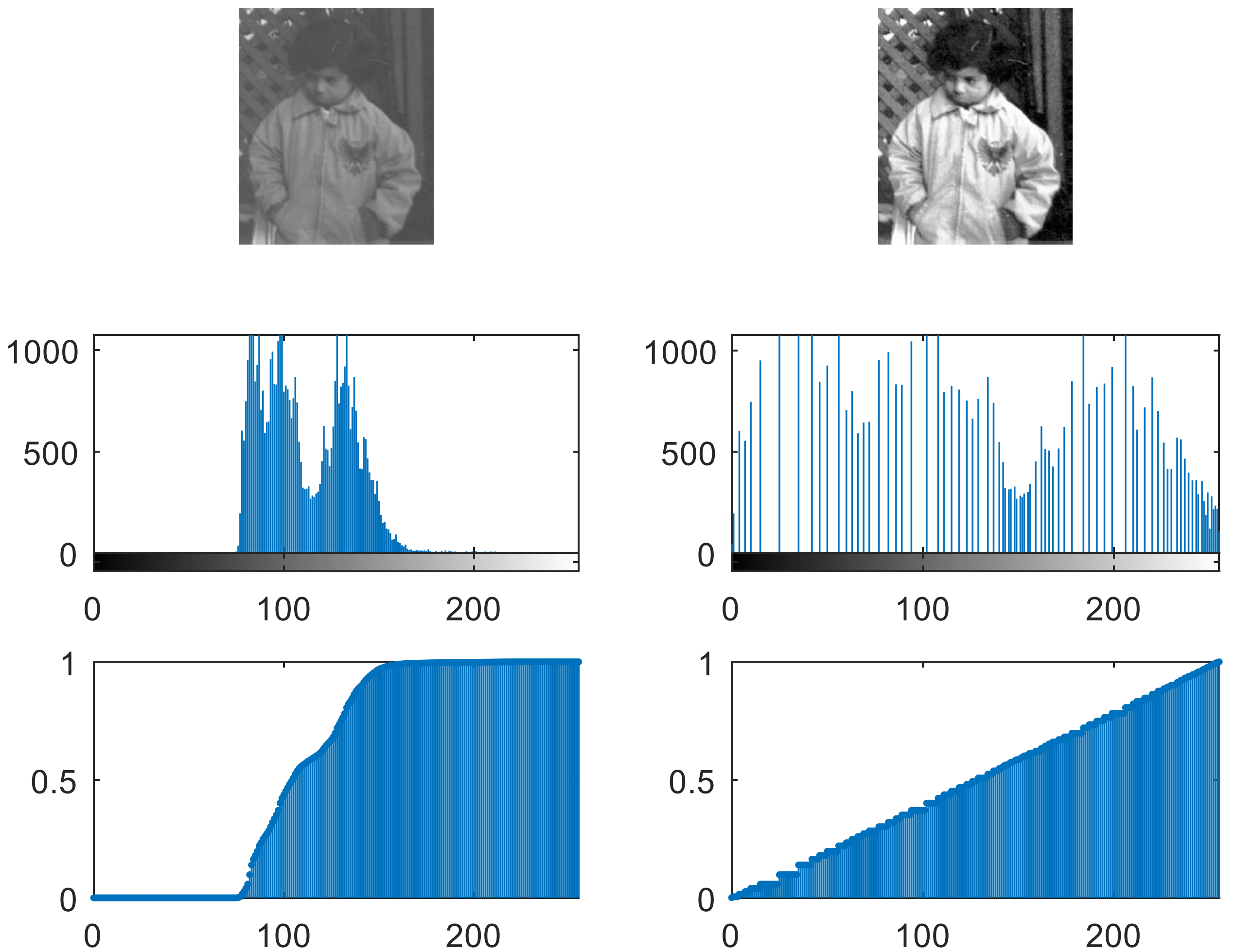
Ιστόγραμμα:

0	15
9	70
10	110
11	45
12	80
13	40



Ισοστάθμιση ιστογράμματος

➢ **Παράδειγμα**



Κατωφλίωση

- Χρήση κατωφλίου για απεικόνιση των L graylevels μιας εικόνας σε 2 προκαθορισμένες τιμές φωτεινότητας c_0 και c_1

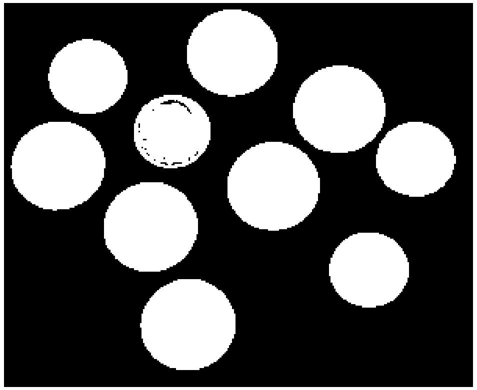
$$y = \begin{cases} c_0, & x < t \\ c_1, & x \geq t \end{cases} \qquad \text{με } 0 \leq t \leq L-1$$

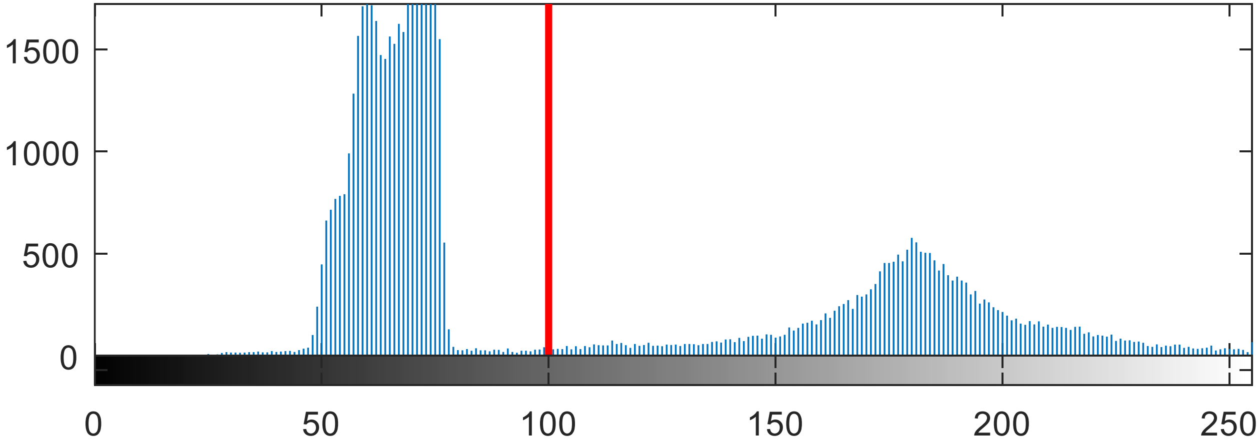
όπου t το κατώφλι φωτεινότητας

- Είναι συνήθης μέθοδος για την μετατροπή μιας grayscale εικόνας σε δυαδική (binary) με $c_0 = 0$ και $c_1 = 1$.
- Χρησιμοποιείται εκτενώς σε προβλήματα τμηματοποίησης (segmentation) για τον διαχωρισμό αντικειμένων από το υπόβαθρο (background).

Κατωφλίωση

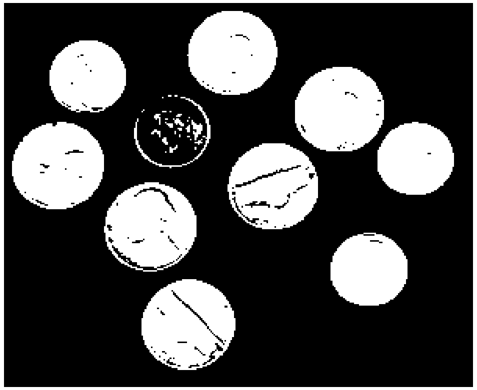
- Παράδειγμα

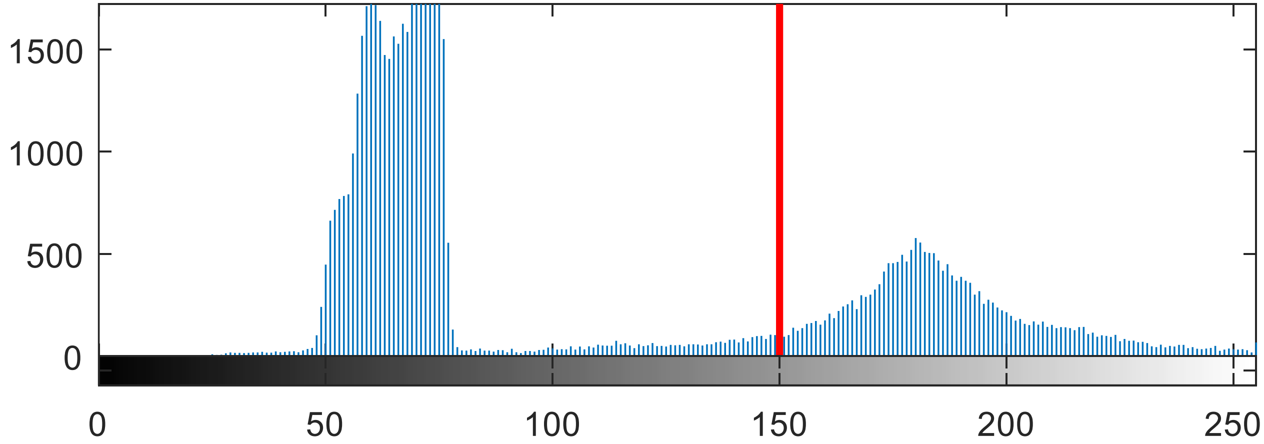




Κατωφλίωση

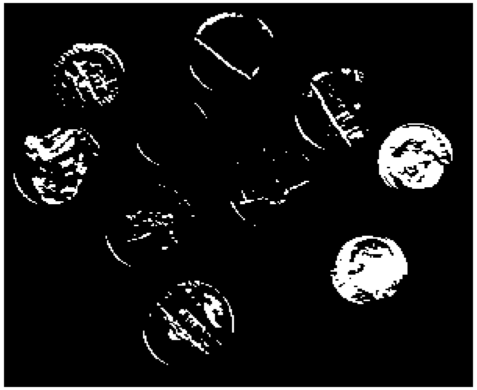
- Παράδειγμα (συν.)

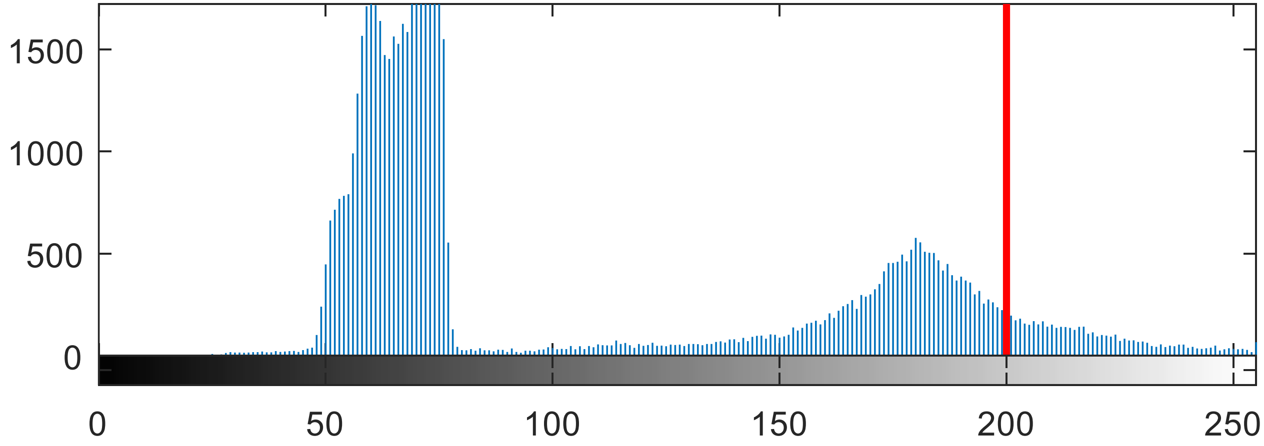




Κατωφλίωση

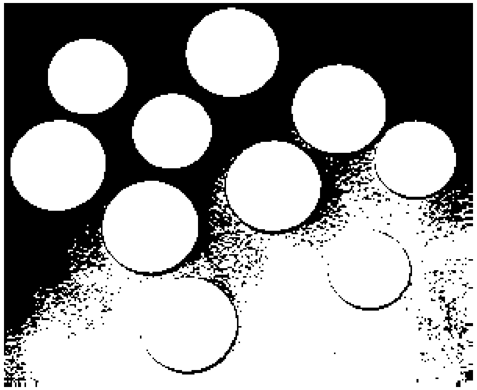
- Παράδειγμα (συν.)

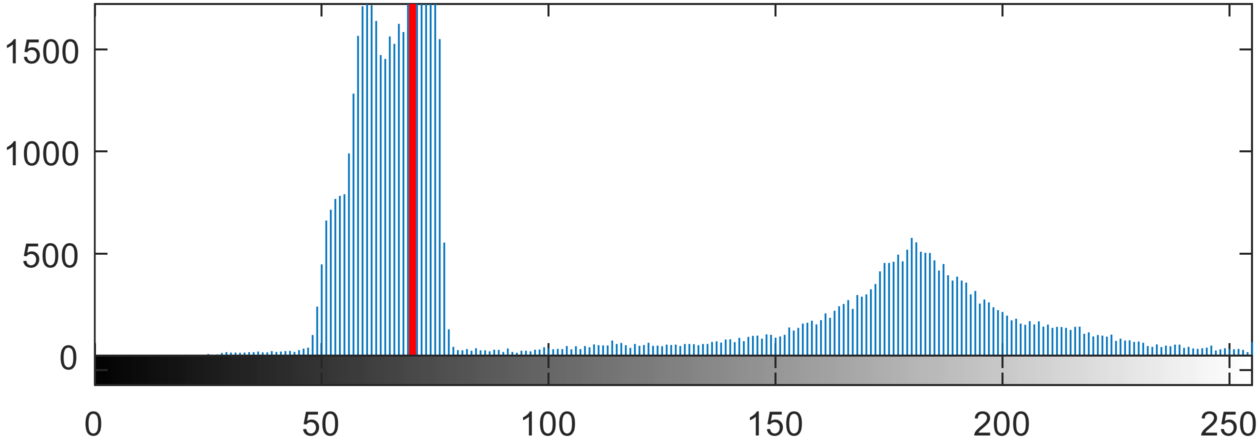




Κατωφλίωση

- Παράδειγμα (συν.)

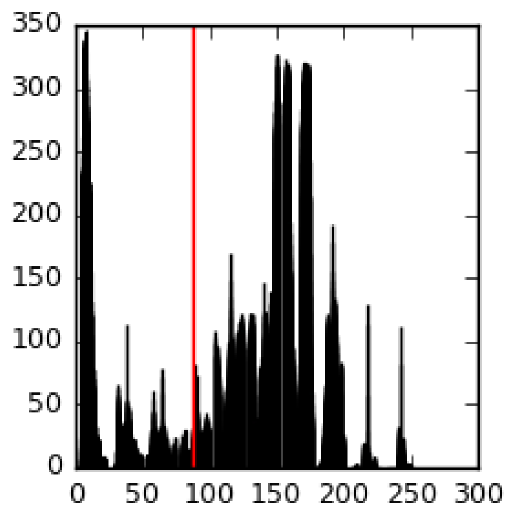




Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

Στόχος

Προσδιορισμός της «βέλτιστης» τιμής κατωφλίου T για τον διαχωρισμό της εικόνας σε δύο κλάσεις και την μετατροπή της σε δυαδική.



Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

Περιγραφή αλγορίθμου

Έστω κατώφλι t με $1 \le t \le L-1$ όπου L το πλήθος των graylevel της εικόνας.

Το κατώφλι χωρίζει την εικόνα σε δύο κλάσεις C_0 και C_1 ως εξής:

$$C_0 = \{(u,v) \mid I(u,v) \in [0 \ldots t-1]\}$$

Τα pixel της 1ης κλάσης

και

$$C_1 = \{(u,v) \mid I(u,v) \in [t \ldots L-1]\}$$

Τα pixel της 2ης κλάσης

Η πιθανότητα κάθε κλάσης είναι

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^{t-1} p_i \quad \text{και} \quad \omega_1(t) = \sum_{i=t}^{L-1} p_i$$

Η μέση τιμή κάθε κλάσης είναι

$$\mu_0(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{i=0}^{t-1} i p_i \quad \text{και} \quad \mu_1(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{i=t}^{L-1} i p_i$$

Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

➢ Περιγραφή αλγορίθμου

Η διασπορά των κλάσεων είναι

$$\sigma_0^2(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{i=0}^{t-1} (i - \mu_0(t))^2 p_i$$

$$\sigma_1^2(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{i=t}^{L-1} (i - \mu_1(t))^2 p_i$$

Συνολική διασπορά **εντός κλάσεων**

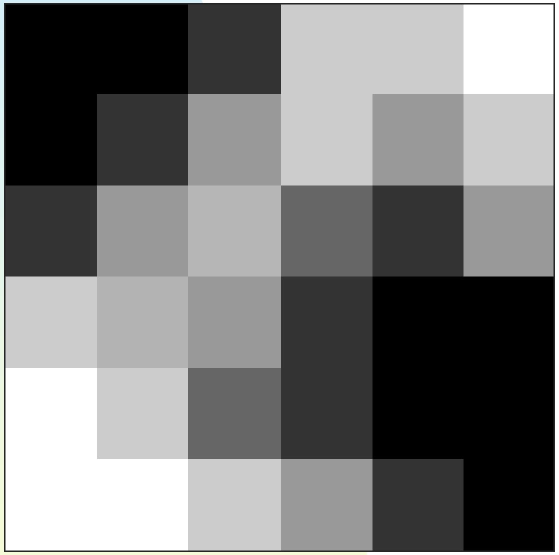
$$\sigma_W^2(t) = \omega_0(t)\sigma_0^2(t) + \omega_1(t)\sigma_1^2(t)$$

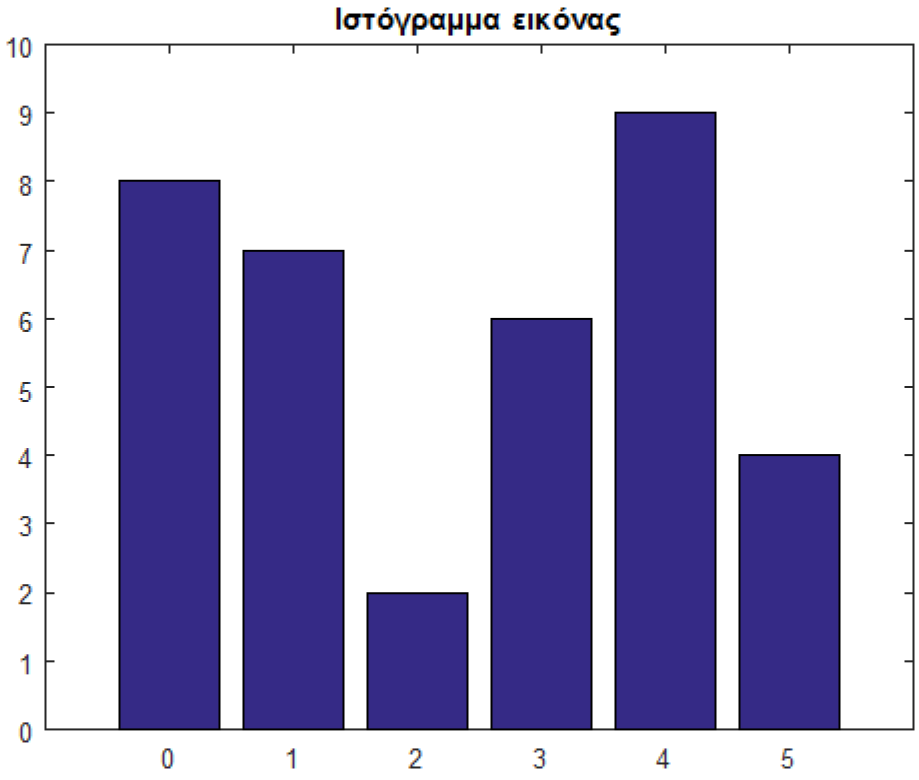
Το κατώφλι $\boldsymbol{T}$ αντιστοιχεί στην τιμή του t που **ελαχιστοποιεί** την διασπορά εντός κλάσεων $\sigma_W(t)$

$$T = \underset{t}{\operatorname{argmin}} \left(\sigma_W^2(t) \right)$$

Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

- Παράδειγμα





Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

➢ Παράδειγμα

- Αριθμητική επίλυση για $t = 3$

Πιθανότητα κλάσης

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^{t-1} p_i = \frac{8}{36} + \frac{7}{36} + \frac{2}{36} = 0.4722$$

$$\omega_1(t) = \sum_{i=t}^{L-1} p_i = \frac{6}{36} + \frac{9}{36} + \frac{4}{36} = 0.5278$$

Μέση τιμή κλάσης

$$\mu_0(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{i=0}^{t-1} i p_i = \frac{1}{0.4722}\left(0 \cdot \frac{8}{36} + 1 \cdot \frac{7}{36} + 2 \cdot \frac{2}{36}\right) = 0.6471$$

$$\mu_1(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{i=t}^{L-1} i p_i = \frac{1}{0.5278}\left(3 \cdot \frac{6}{36} + 4 \cdot \frac{9}{36} + 5 \cdot \frac{4}{36}\right) = 3.8947$$

Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

➢ Παράδειγμα

- Αριθμητική επίλυση για $t = 3$

Διασπορά κλάσης

$$\sigma_0^2(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{i=0}^{t-1} (i - \mu_0(t))^2 p_i$$

$$= \frac{1}{0.4722}\left((0 - 0.6471)^2 \cdot \frac{8}{36} + (1 - 0.6471)^2 \cdot \frac{7}{36} + (2 - 0.6471)^2 \cdot \frac{2}{36} \right)$$

$$= 0.4637$$

$$\sigma_1^2(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{i=t}^{L-1} (i - \mu_1(t))^2 p_i$$

$$= \frac{1}{0.5278}\left((3 - 3.8947\ )^2 \cdot \frac{6}{36} + (4 - 3.8947\ )^2 \cdot \frac{9}{36} + (5 - 3.8947\ )^2 \cdot \frac{4}{36} \right)$$

$$= 0.5152$$

Συνολική διασπορά **εντός κλάσεων**

$$\sigma_W(t) = \omega_0(t)\sigma_0^2(t) + \omega_1(t)\sigma_1^2\ (t) = 0.4722 \cdot 0.4637 + 0.5277 \cdot 0.5152$$

$$= 0.4909$$

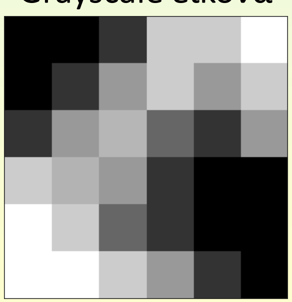
Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

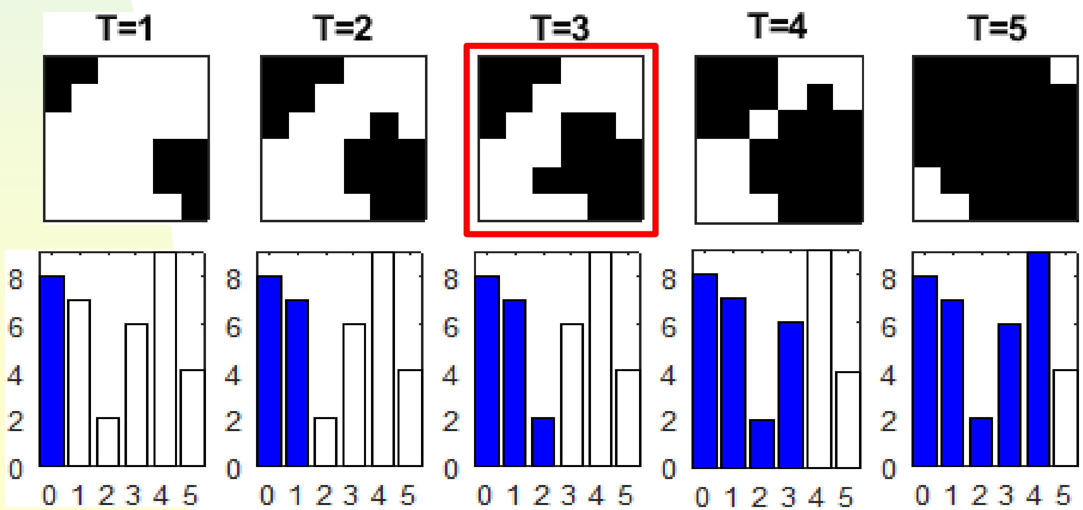
➢ Παράδειγμα

- Υπολογισμός για όλα τα t

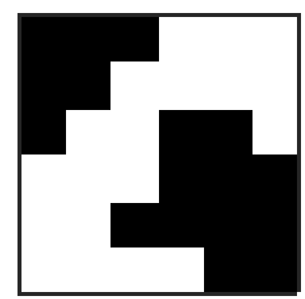
	$T = 1$	$T = 2$	$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$
$w_0(t)$	0.2222	0.4167	0.4722	0.6389	0.8889
$m_0(t)$	0	0.4667	0.6471	1.2609	2.0313
$s_0(t)$	0	0.2489	0.4637	1.4102	2.5303
$w_1(t)$	0.7778	0.5833	0.5278	0.3611	0.1111
$m_1(t)$	3.0357	3.7143	3.8947	4.3077	5.0000
$s_1(t)$	1.9630	0.7755	0.5152	0.2130	0.0000
$\boldsymbol{s_W(t)}$	**1.5268**	**0.5561**	**0.4909**	**0.9779**	**2.2491**

Grayscale εικόνα





Binary εικόνα



Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

➢ Ταχύτερη παραλλαγή αλγορίθμου

Ο υπολογισμός του κατωφλίου T μπορεί να υπολογιστεί μέσω της διασποράς **μεταξύ** των κλάσεων.

Συνολική διασπορά της εικόνας

$$\sigma^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2$$

Διασπορά **μεταξύ** των κλάσεων

$$\sigma_B^2(t) = \omega_0(t)(\mu_0(t) - \mu)^2 + \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 \rightarrow$$

$$\sigma_B^2(t) = \omega_0(t)\omega_1(t)\big(\mu_0(t) - \mu_1(t)\big)^2$$

όπου

$$\mu = \omega_0(t)\mu_0(t) + \omega_1(t)\mu_1(t) = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i$$

Το κατώφλι $\boldsymbol{T}$ αντιστοιχεί στην τιμή του t που **μεγιστοποιεί** την διασπορά μεταξύ κλάσεων $\sigma_B(t)$

$$T = \underset{t}{\operatorname{argmax}}\big(\sigma_B(t)\big)$$

Μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

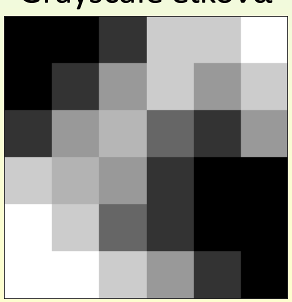
➢ Παράδειγμα

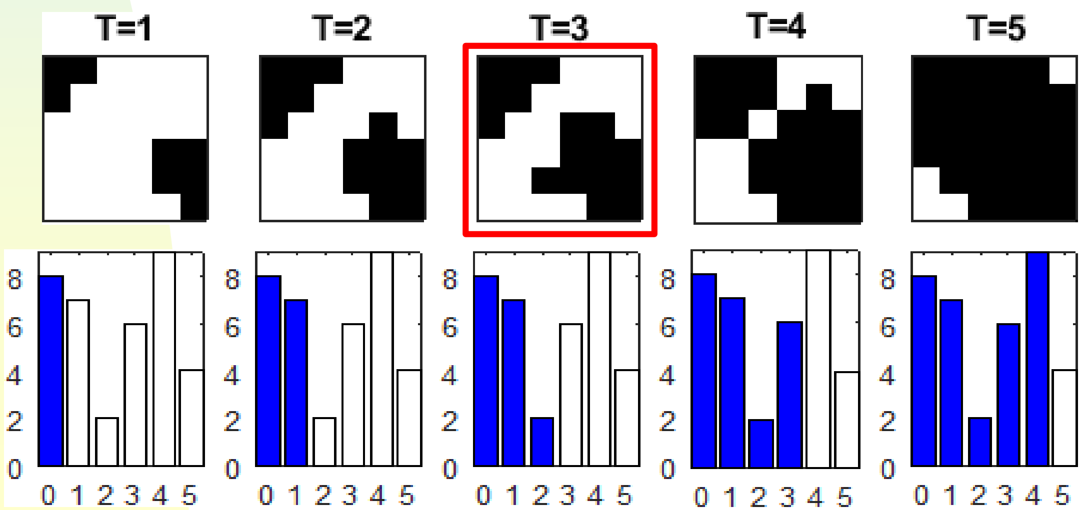
- Υπολογισμός για όλα τα t μέσω της διασποράς **μεταξύ** κλάσεων

	$T = 1$	$T = 2$	$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$
$w_0(t)$	0.2222	0.4167	0.4722	0.6389	0.8889
$m_0(t)$	0	0.4667	0.6471	1.2609	2.0313
$w_1(t)$	0.7778	0.5833	0.5278	0.3611	0.1111
$m_1(t)$	3.0357	3.7143	3.8947	4.3077	5.0000
$s_W(t)$	1.5268	0.5561	0.4909	0.9779	2.2491
$\boldsymbol{s_B(t)}$	**1.5928**	**2.5635**	**2.6287**	**2.1417**	**0.8705**

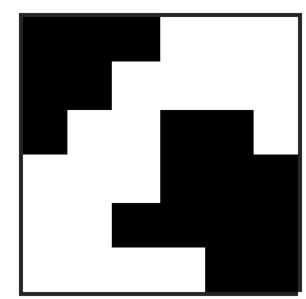
Συνολική διασπορά $\sigma^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2 = 3.1196$

Grayscale εικόνα





Binary εικόνα



Προσαρμοσμένη κατωφλίωση

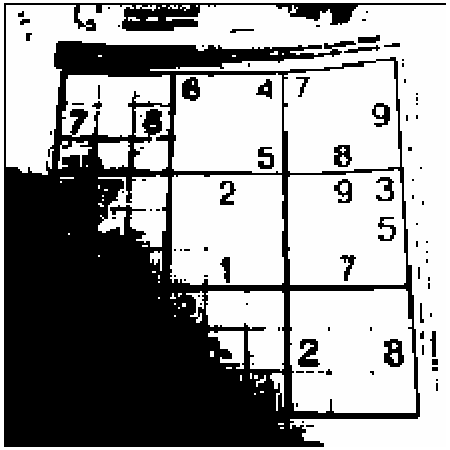
- Υπολογισμός του κατωφλίου βάσει της τοπικής πληροφορίας

Εφαρμογή σε εικόνες όπου η καθολική κατωφλίωση παράγει μη ικανοποιητικά αποτελέσματα, π.χ. εικόνες με μεταβλητό θόρυβο, ανομοιόμορφη φωτεινότητα υποβάθρου, τοπικά χαμηλή αντίθεση κ.α.

Το κατώφλι φωτεινότητας για κάθε pixel x_i της εικόνας I υπολογίζεται από τις τιμές των pixel σε ένα παράθυρο R_i γύρω από το x_i.

Grayscale εικόνα

Μέθοδος Otsu



Οι τιμές φωτεινότητας που αντιστοιχούν στο κείμενο και στο υπόβαθρο επικαλύπτονται

Προσαρμοσμένη κατωφλίωση

- Τεχνικές

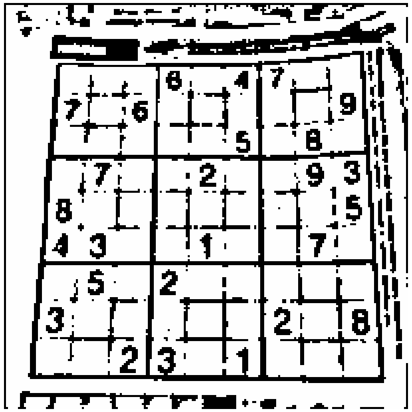
Μέση ή ενδιάμεση τιμή

Το κατώφλι t επιλέγεται ως η μέση ή ενδιάμεση τιμή των pixel του παραθύρου:

$$t_i = mean(R_i) - C$$

Ή

$$t_i = median(R_i) - C$$



Ενδιάμεση graylevel τιμή

Το κατώφλι επιλέγεται ως η ενδιάμεση τιμή των pixel του παραθύρου:

$$t_i = \frac{min(R_i) + max(R_i)}{2} - C$$

Η σταθερά C έχει 0 ή θετική τιμή. Για τιμές πχ. 5 ή 10 βελτιώνει τα αποτελέσματα σε περιοχές της εικόνας με ομοιογενή φωτεινότητα.

Προσαρμοσμένη κατωφλίωση

Τεχνικές

Μέθοδος Bernsen

Έστω η ενδιάμεση τιμή του παραθύρου

$$t_i = \frac{min(R_i) + max(R_i)}{2}$$

Ο χρήστης καθορίζει ένα κατώφλι αντίθεσης k.

Εάν $\max(R_i) - \min(R_i) \geq k$ τότε

$$y_i = \begin{cases} c_0, & x_i < t_i \\ c_1, & x_i \geq t_i \end{cases}$$

Αλλιώς το παράθυρο θεωρείται ότι αποτελείται από pixel της ίδιας κλάσης οπότε

$$y_i = \begin{cases} c_0, & t_i < 128 \\ c_1, & t_i \geq 128 \end{cases}$$