

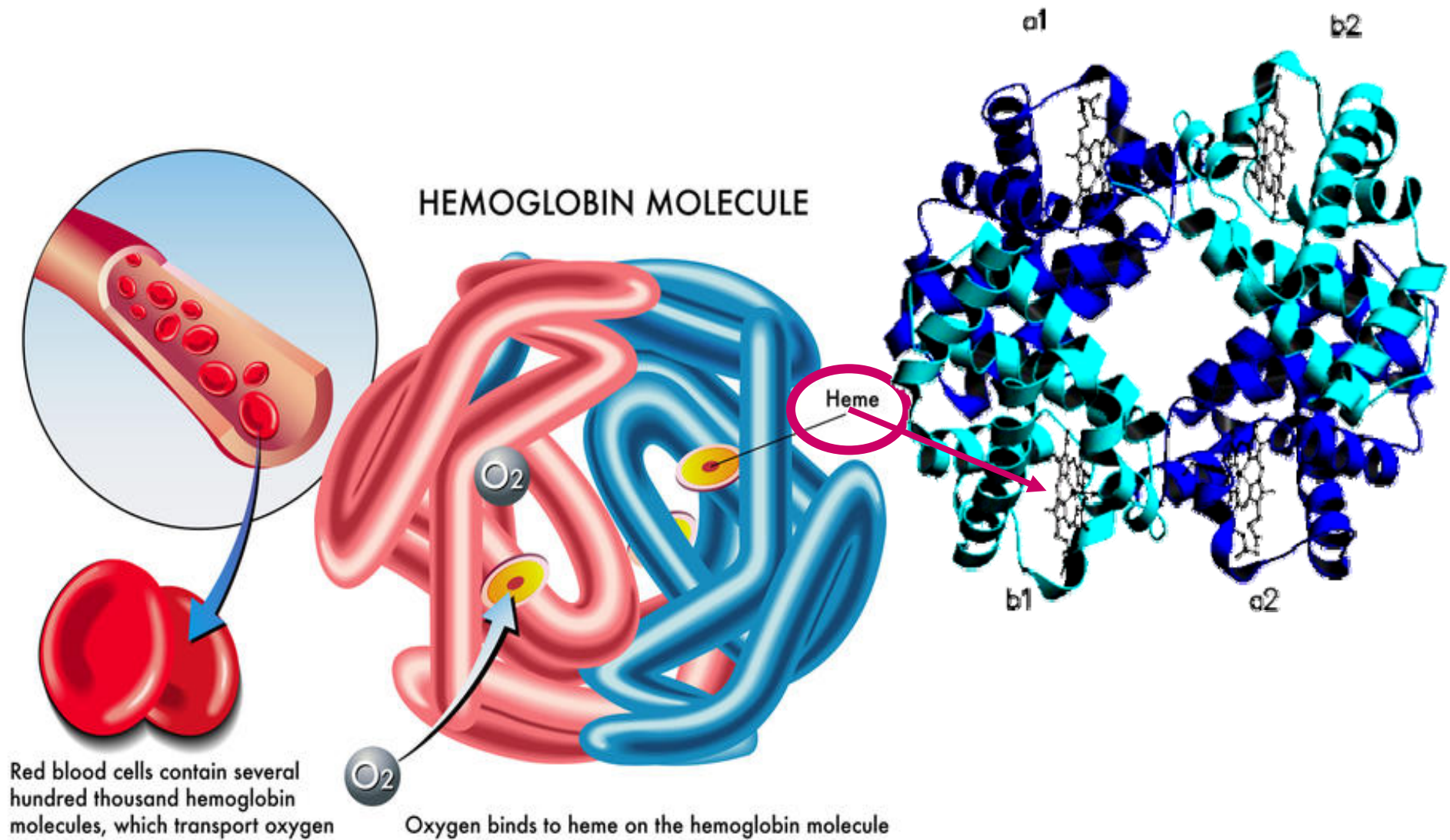
ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΗ: ΔΟΜΗ ΕΚΦΡΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΦΑΙΡΙΝΙΚΩΝ ΓΟΝΙΔΙΩΝ

ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΟΠΑΘΕΙΕΣ - ΘΑΛΑΣΑΙΜΙΕΣ

Α. ΠΑΠΑΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΥ

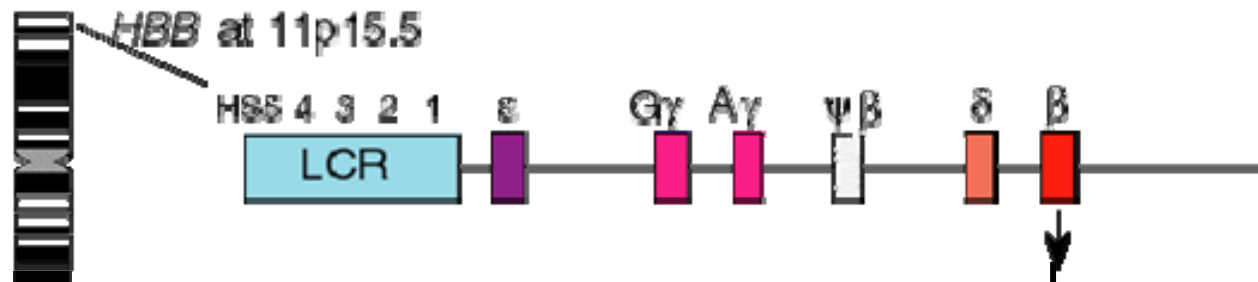
20 Φεβρουαρίου 2013

Δομή της αιμοσφαιρίνης Α του ανθρώπου

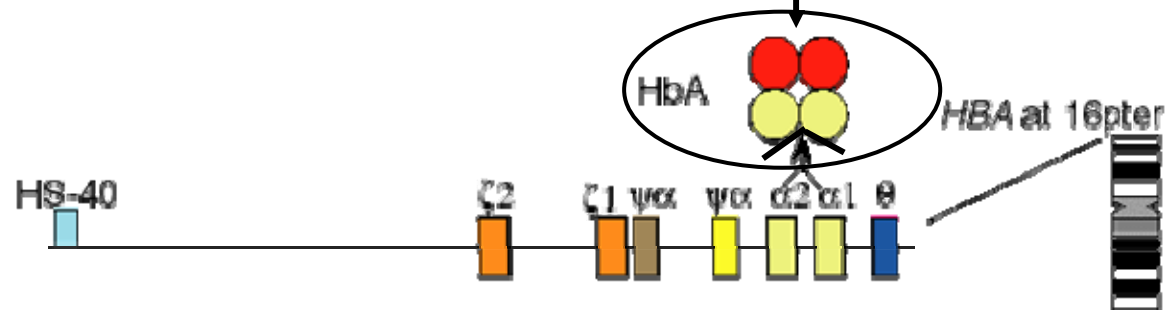


Δύο γονιδιακοί τόποι ευθύνονται για την παραγωγή της αιμοσφαιρίνης στον άνθρωπο:

Το σύμπλεγμα των γονιδίων της σφαιρίνης β



Το σύμπλεγμα των γονιδίων της σφαιρίνης α



Όλα τα γονίδια των α & β συμπλεγμάτων σφαιρίνης έχουν την ίδια δομή :

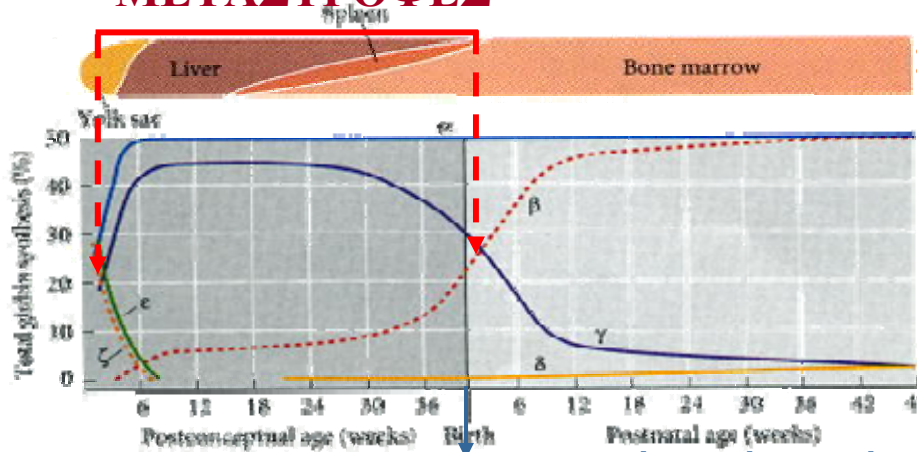
Απαρτίζονται από 3 εξόνια και 2 ιντρόνια

Globin Chain	5' region	Exon I	Intron I	Exon II	Intron II	Exon III	3' region	Bases	Amino acids
ε	53	90	122	222	858	126	118		
		1-30		31-104		105-146			
αγ	53	90	122	222	868	126	87		
		1-30		31-104		105-146			
γγ	53	90	122	222	868	126	87		
		1-30		31-104		105-146			
δ	49	90	128	222	868	126	128		
		1-30		31-104		105-146			
β	50	90	122	222	858	126	132		
		1-30		31-104		105-146			
α	37	93	113	204	141	129	112		
		1-31		32-99		100-141			

ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΣΦΑΙΡΙΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

ΜΕΤΑΣΤΡΟΦΕΣ

Ολική σύνθεση σφαιρινών %



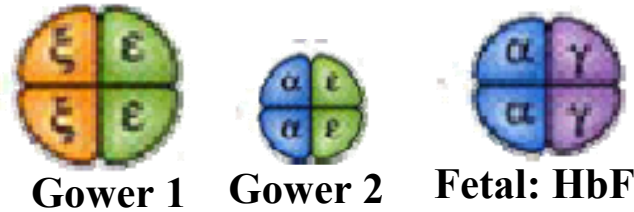
:Θέσεις ερυθροποίησης

Ηλικία μετά την σύλληψη (εβδομάδες)

ΓΕΝΝΗΣΗ

Ηλικία μετά την γέννηση (εβδομάδες)

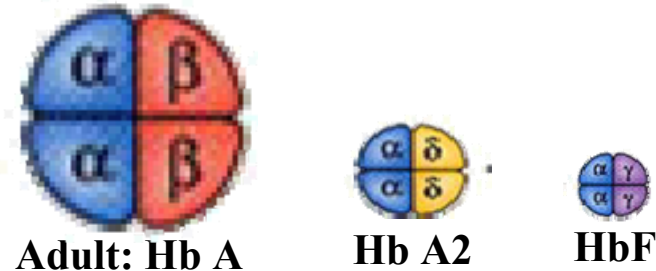
Μέχρι την 6η εβδομάδα μετά την σύλληψη συντίθενται οι εμβρυονικές αιμοσφαιρίνες



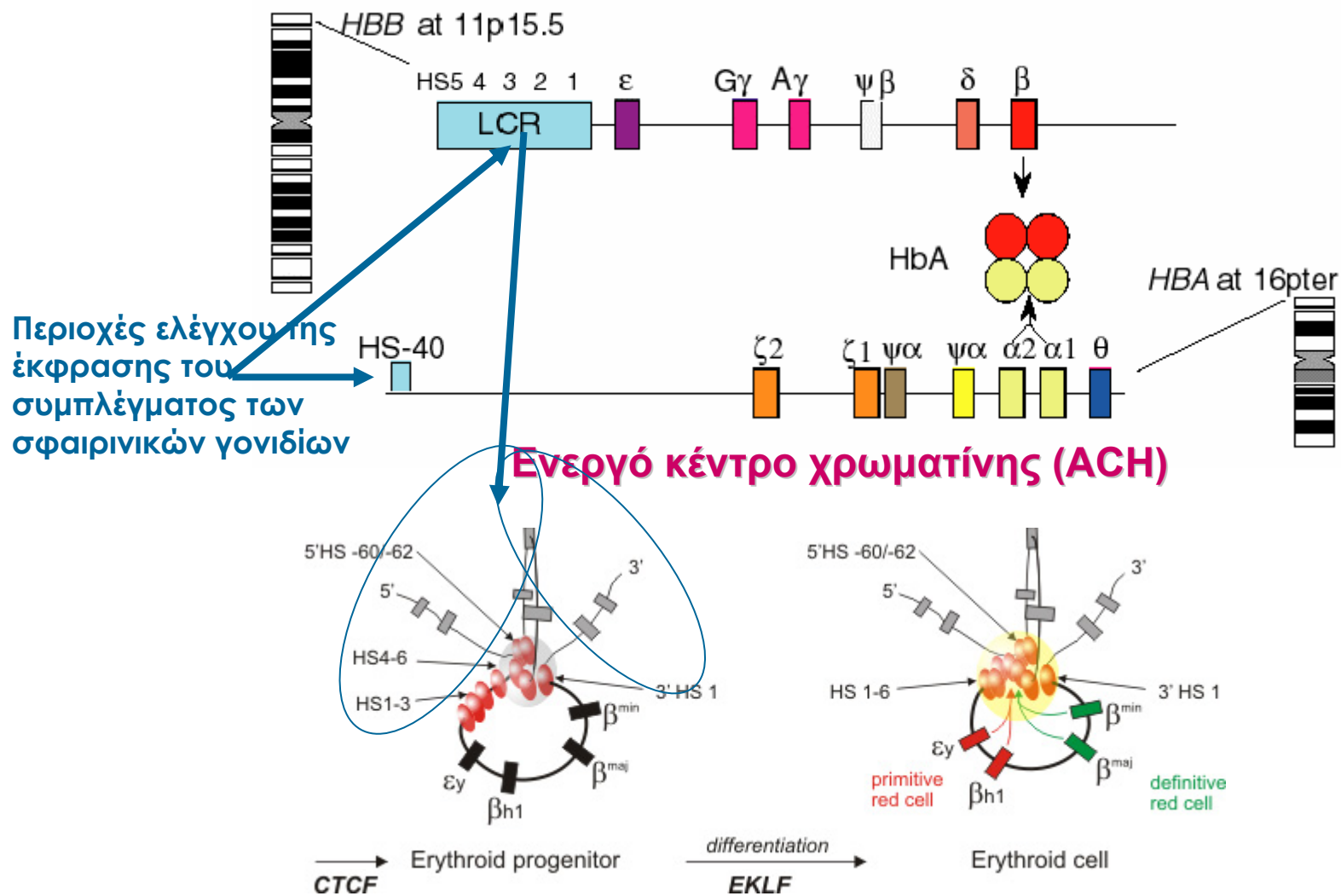
Κατά την 10η εβδομάδα και μέχρι το τέλος της κύησης συντίθεται η εμβρυϊκή αιμοσφαιρίνη F



Μετά την 12η εβδομάδα μετά την γέννηση συντίθενται οι αιμοσφαιρίνες των ενηλίκων A και A₂



Η ρύθμιση της έκφρασης των σφαιρινικών γονιδίων γίνεται κυρίως κατά την μεταγραφή τους, δημιουργείται το **ενεργό κέντρο χρωματίνης**, όπου η LCR περιοχή αλληλεπιδρώντας με το εκάστοτε σφαιρινικό γονίδιο επιτρέπει την ειδική, ιστική και χρονική έκφραση του κατά την ανάπτυξη του ανθρώπου



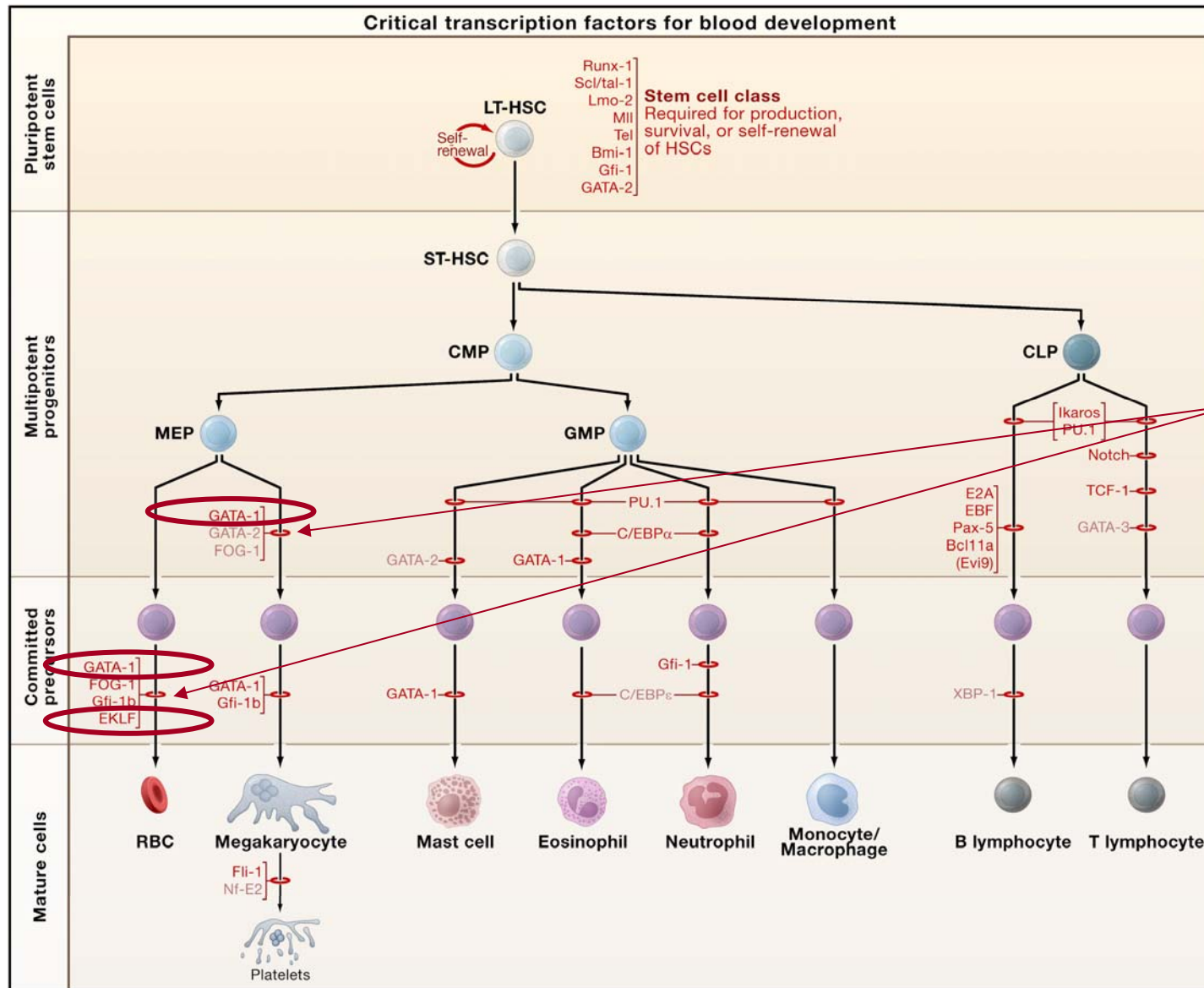
Η LCR **ασκεί** μακράς εμβέλειας **δράση** και σε συνεργασία με τον υποκινητή του εκάστοτε προς μεταγραφή γονιδίου, ρυθμίζει την ιστική και ειδική έκφραση του.

Αυτό γίνεται με την απαραίτητη παρουσία:

Γενικών και **ειδικών** μεταγραφικών παραγόντων, που αναγνωρίζουν και προσδένονται σε θέσεις της LCR υποβοηθώντας την λειτουργία της και την αναγνώριση του καθενός προς μεταγραφή γονιδίου.

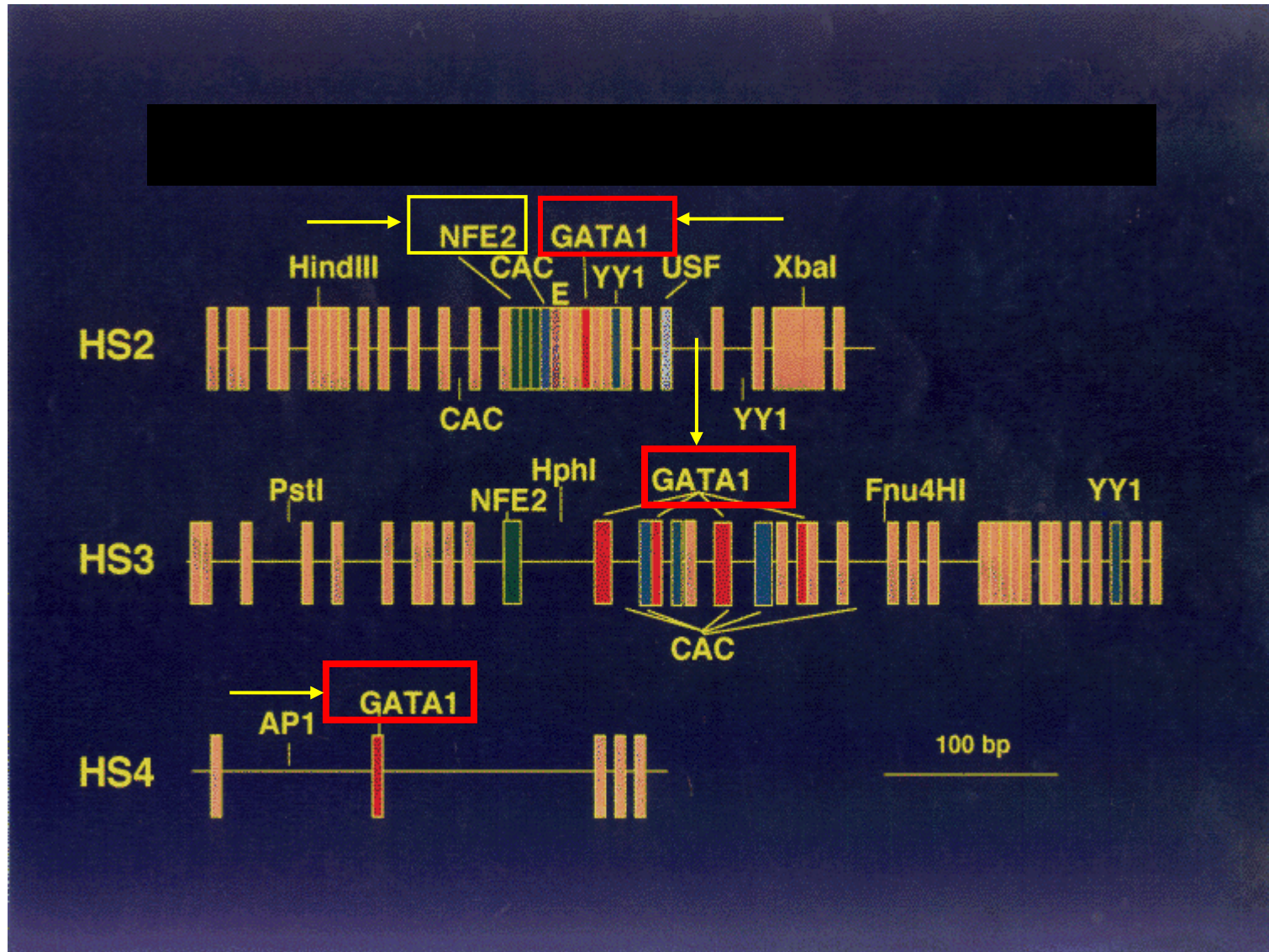
Παρατηρείστε, ότι συγκεκριμένοι ειδικοί μεταγραφικοί παράγοντες (GATA - 1, GATA - 2, EKLF, κ.α) είναι παρόντες σε όλα τα στάδια της αιμοποίησης στον άνθρωπο

ΜΕΤΑΓΡΑΦΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ-ΕΙΔΙΚΟΙ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΟΙ ΣΤΗΝ ΑΙΜΟΠΟΙΗΣΗ

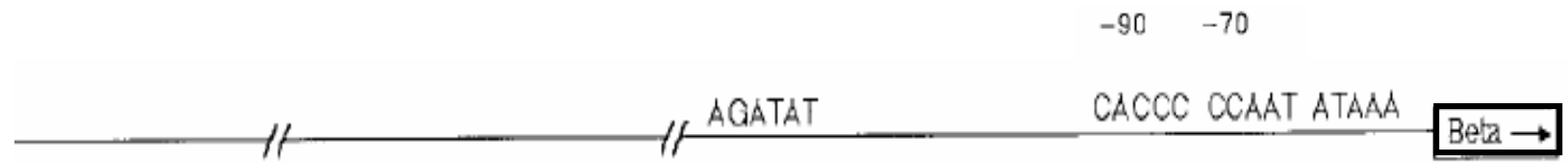
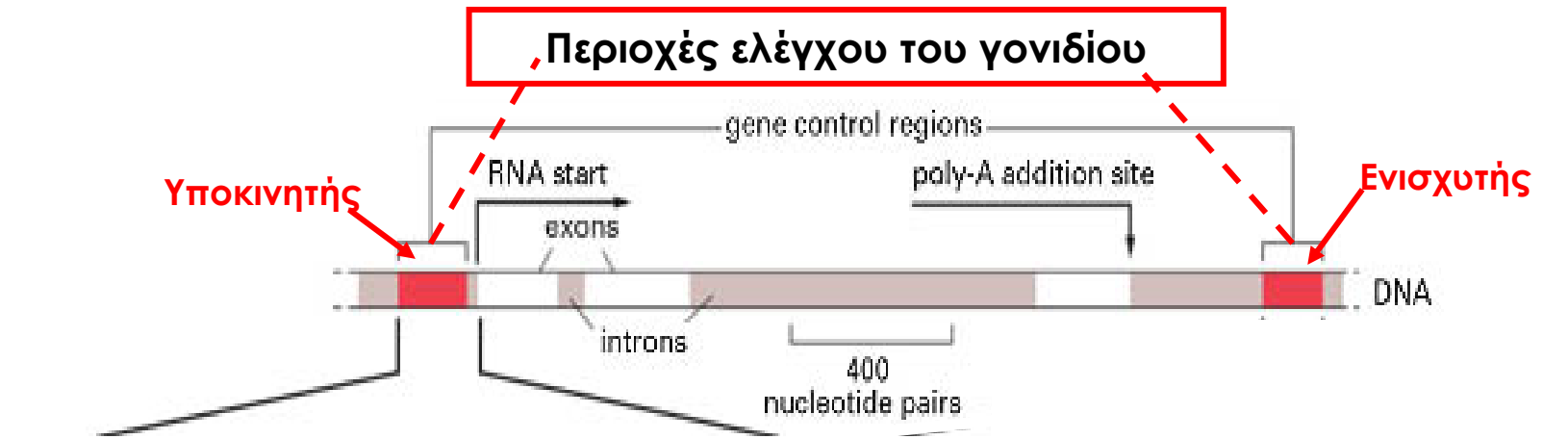


Οι κόκκινες οριζόντιες γραμμές υποδηλώνουν, ότι η απουσία του συγκεκριμένου μεταγραφικού παράγοντα δεν είναι συμβατή με την ζωή

Γενικοί και **ειδικοί** μεταγραφικοί παράγοντες αναγνωρίζουν και προσδένονται σε αλληλουχίες της LCR που θα αλληλεπιδράσει με το εκάστοτε σφαιρινικό γονίδιο, προκειμένου αυτό να **εκφραστεί**



Αντίστοιχοι γενικοί και ειδικοί μεταγραφικοί παράγοντες προσδένονται και στον υποκινητή του γονιδίου της σφαιρίνης β, που αλληλεπιδρά με την LCR προκειμένου να εκφραστεί



Ειδικός καθοριστικός μεταγραφικός παράγοντας για την έκφραση όλων των κυττάρων της ερυθράς σειράς

Ειδικός μεταγραφικός παράγοντας καθοριστικός για την έκφραση του β-γονιδίου



Ρύθμιση του ρυθμού της μεταγραφής & της μετάφρασης

ΑΡΑ, στον ενήλικα (σε κάθε διπλοειδές κύτταρο) υπάρχουν:

- **4 ενεργά** γονίδια σφαιρίνης α
- **2 ενεργά** γονίδια σφαιρίνης β

Πως ρυθμίζεται η τελική αναλογία;

mRNA σφαιρίνης α: mRNA σφαιρίνης β **1,4:1**

αλυσίδες σφαιρίνης - α: αλυσίδες σφαιρίνης - β **1:1**

Η ρύθμιση γίνεται:

α) σε επίπεδο **μεταγραφής**: το mRNA της σφαιρίνης β έχει ταχύτερο **ρυθμό μεταγραφής**

β) σε επίπεδο **μετάφρασης**: το mRNA της σφαιρίνης β **ανταγωνίζεται** καλύτερα, για την **δέσμευση** των παραγόντων έναρξης της **μετάφρασης**.

Μικρή ανισορροπία αλυσίδων α > β, εξισορροπείται με πρωτεόλυση της περισσείας των αλυσίδων α.

Άλλο **ρυθμιστικό στοιχείο** της αναλογίας των σφαιρινικών αλυσίδων είναι:

Το επίπεδο της **αίμης**, που **ρυθμίζει** την σύνθεση των.

Προκειμένου να **συντεθεί** ένα μόριο αιμοσφαιρίνης Α
χρειάζονται:

2 αλυσίδες α : 2 αλυσίδες β : 4 μόρια αίμης

Η **περίσσεια αίμης αναστέλλει** την περαιτέρω **σύνθεση της**

Η **περίσσεια αίμης υποκινεί** την **σύνθεση των σφαιρινικών αλυσίδων.**

ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΟΙ ΦΑΙΝΟΤΥΠΟΙ

Μεσογειακή αναιμία / Θαλασσαιμία : **ανισορροπία** της σύνθεσης των σφαιρινικών αλυσίδων

α-θαλασσαιμία: έλλειψη αλυσίδων α

Επηρεάζει την προ - και μετα -γεννητική περίοδο

Οφείλεται κυρίως σε **ελλείψεις** των α – γονιδίων

β-θαλασσαιμία: έλλειψη αλυσίδων β

β⁺ : ελάττωση β αλυσίδων

β⁰: πλήρης έλλειψη β αλυσίδων

Επηρεάζει την μετα- γεννητική περίοδο

Οφείλεται κυρίως σε **σημειακές μεταλλάξεις**, που **επηρεάζουν**:

είτε την **δομή** της παραγόμενης πρωτεΐνη – **δομικές παραλλαγές**

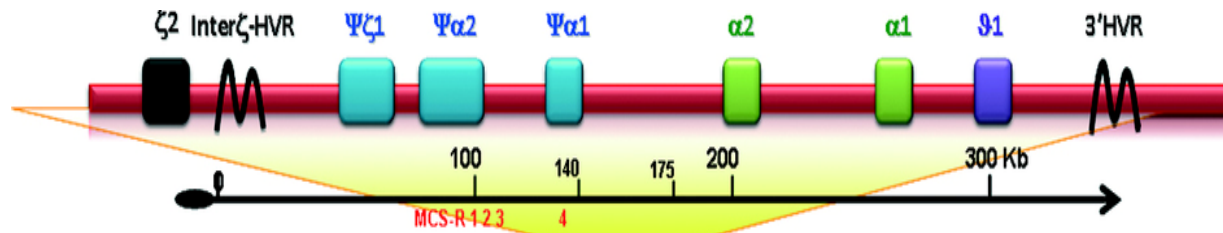
είτε το **ποσό** της παραγόμενης πρωτεΐνης **επηρεάζοντας** σχεδόν

όλα τα στάδια **ρύθμισης της έκφρασης** των σφαιρινικών γονιδίων

(μεταγραφικές, μετα – μεταγραφικές ή μεταφραστικές διαδικασίες)

Το γενετικό υπόστρωμα της α – θαλασσαιμίας - γονότυπος

Η α- θαλασσαιμία οφείλεται κυρίως σε ελλείψεις των α γονιδίων



α-globin gene cluster and deletions associated with α^o (A) and α⁺ (B) thalassemia.

- MC
- CAL
- Dutch I
- THAI
- MED II
- FIL
- KOL
- BRIT
- (α)^{20.5}
- MA
- SA
- MED I
- SEA
- PP
- CANT
- SPAN
- GEO
- (α)^{5.2}
- α^{16.6}
- α^{7.9}
- (α) α^{5.3}
- α^{4.2}
- α^{3.7 I}
- α^{3.7 II}
- α^{3.7 III}
- α- α^{Δ970}
- α^{2.4}

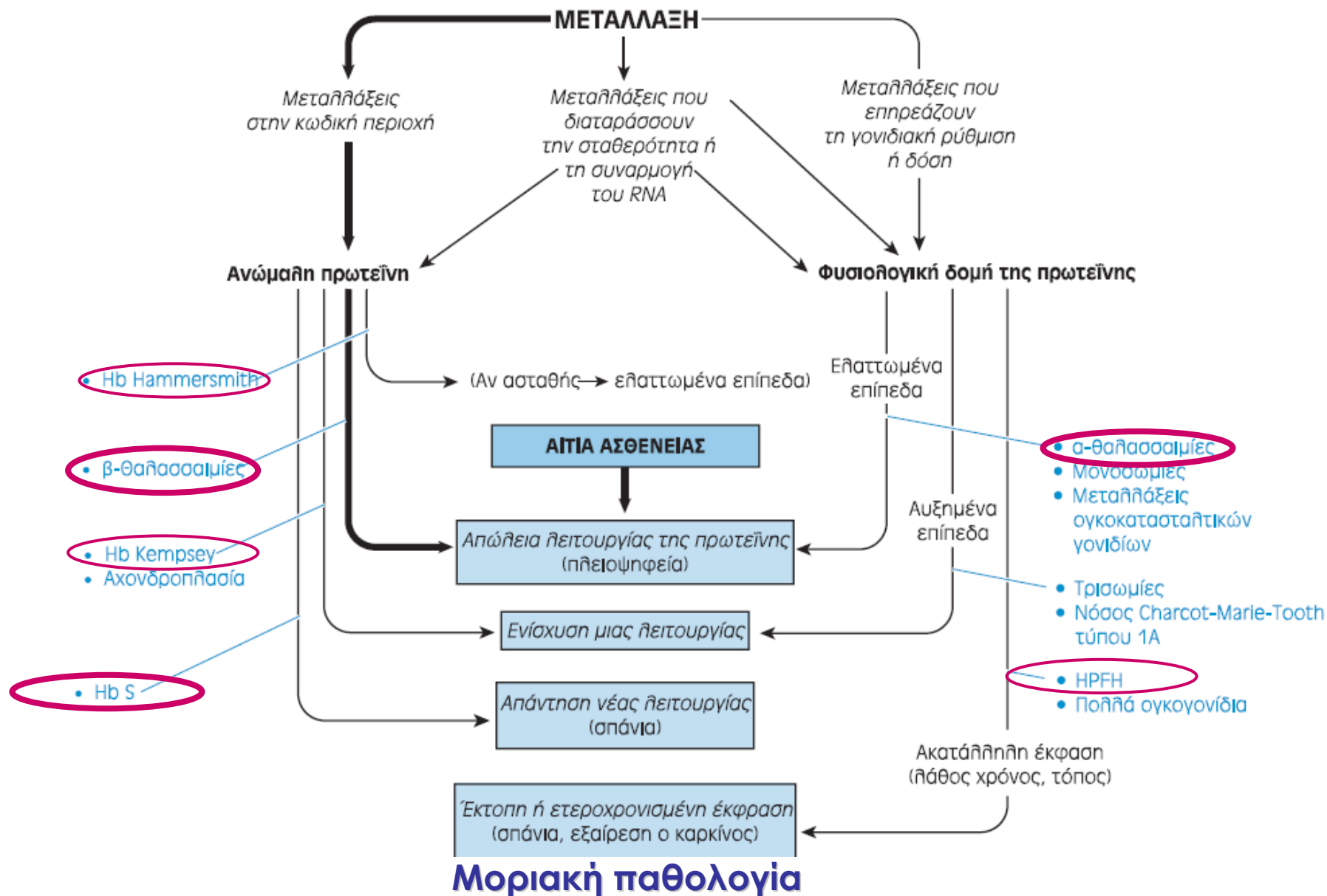
Alpha-thalassemia Genetics and Clinical Consequences

γονότυπος – κλινικός φαινότυπος

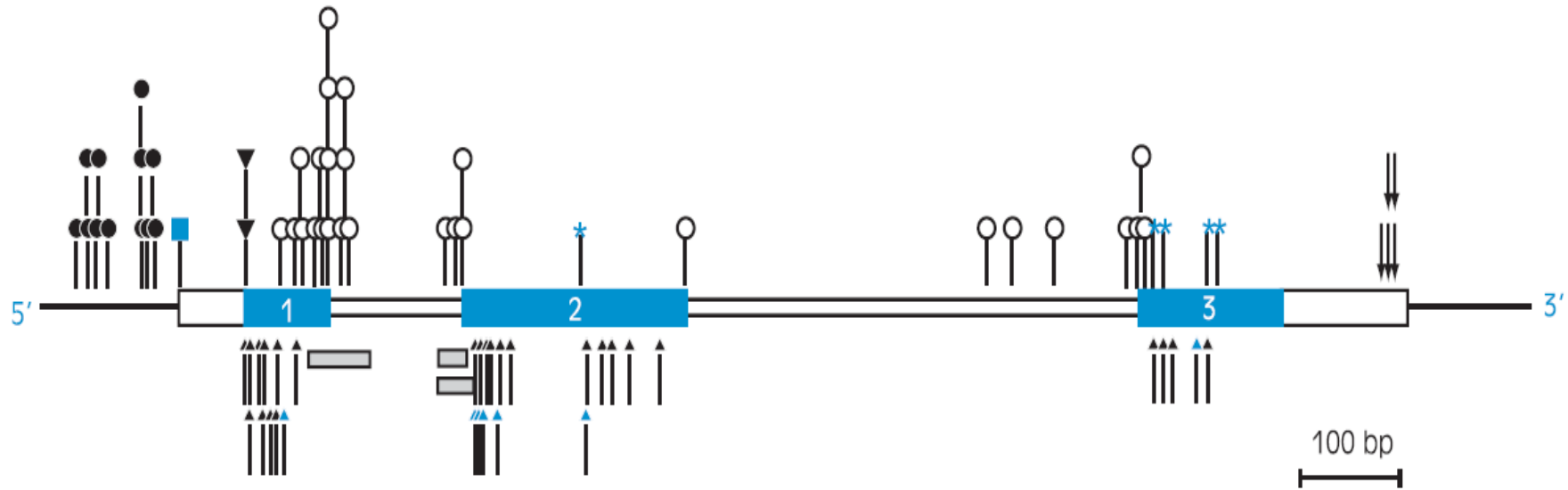
Normal		φυσιολογικός
(A) Carrier: Asymptomatic No abnormalities		ασυμπτωματικός
α-thal minor: Asymptomatic Mild microcytic anemia		Ελάσσων α- θαλασσαιμία
Hb H Disease: Symptomatic Hemolytic and Microcytic anemia Splenomegaly		Παθολογικός HbH αιμοσφαιρινοπάθεια Αιμόλυση, μικροκυτταρική αναιμία σπληνομεγαλία
(B) Incompatible with Life Hydrops Fetalis		Εμβρυϊκός ύδρωπας μη συμβατός με την ζωή

ΟΙ ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΟΠΑΘΕΙΕΣ ΟΦΕΙΛΟΝΤΑΙ ΚΥΡΙΩΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΑΞΕΙΣ ΤΩΝ ΓΟΝΙΔΙΩΝ ΤΩΝ α και β - ΣΦΑΙΡΙΝΩΝ

Η ΦΥΣΗ ΚΑΙ Η ΘΕΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΑΞΕΩΝ



Οι θέσεις και η φύση μεταλλάξεων στο γονίδιο - β



- | | | | |
|---|-------------------|---|-------------------------------|
| ● | Μεταγραφή | ↑ | Μετατόπιση πλαισίου ανάγνωσης |
| ○ | Συναρμογή RNA | ▲ | Μη νοσηματικό κωδικόνιο |
| ■ | Θέση καλύπτρας | * | Ασταθής σφαιρίνη |
| ↓ | Διάσπαση RNA | ▭ | Μικρή έλλειψη |
| ▼ | Κωδικόνιο έναρξης | | |

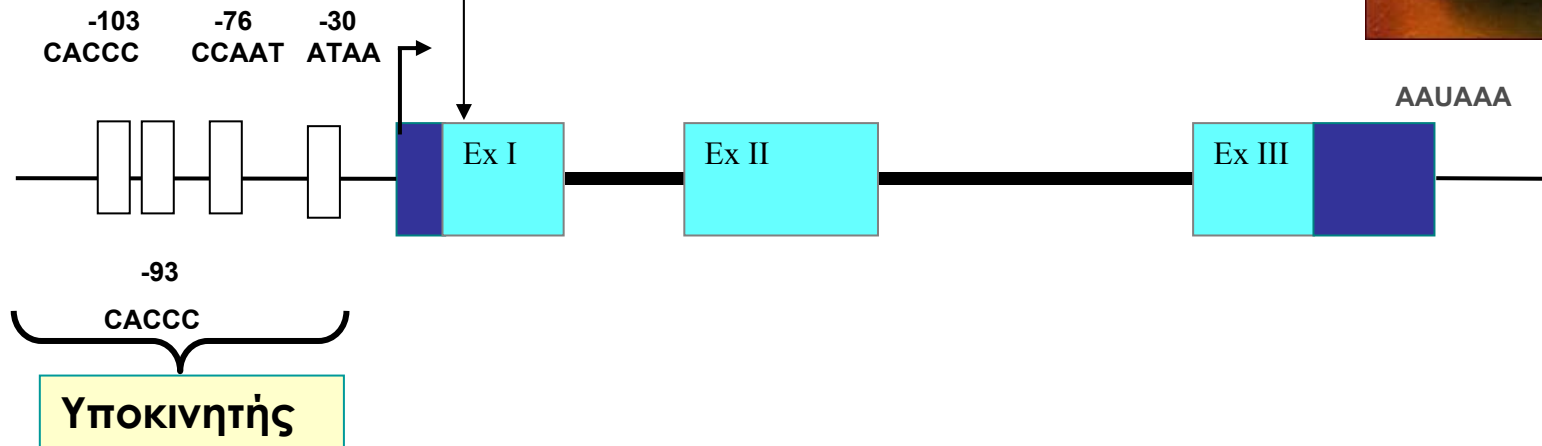
Έχουν προσδιορισθεί περί τις 300 σημειακές μεταλλάξεις που προκαλούν β - θαλασσαιμία

Α. Μεταλλάξεις που επηρεάζουν τη δομή της β-αλυσίδας Το παράδειγμα της **Δρεπανοκυτταρικής Αναιμίας**

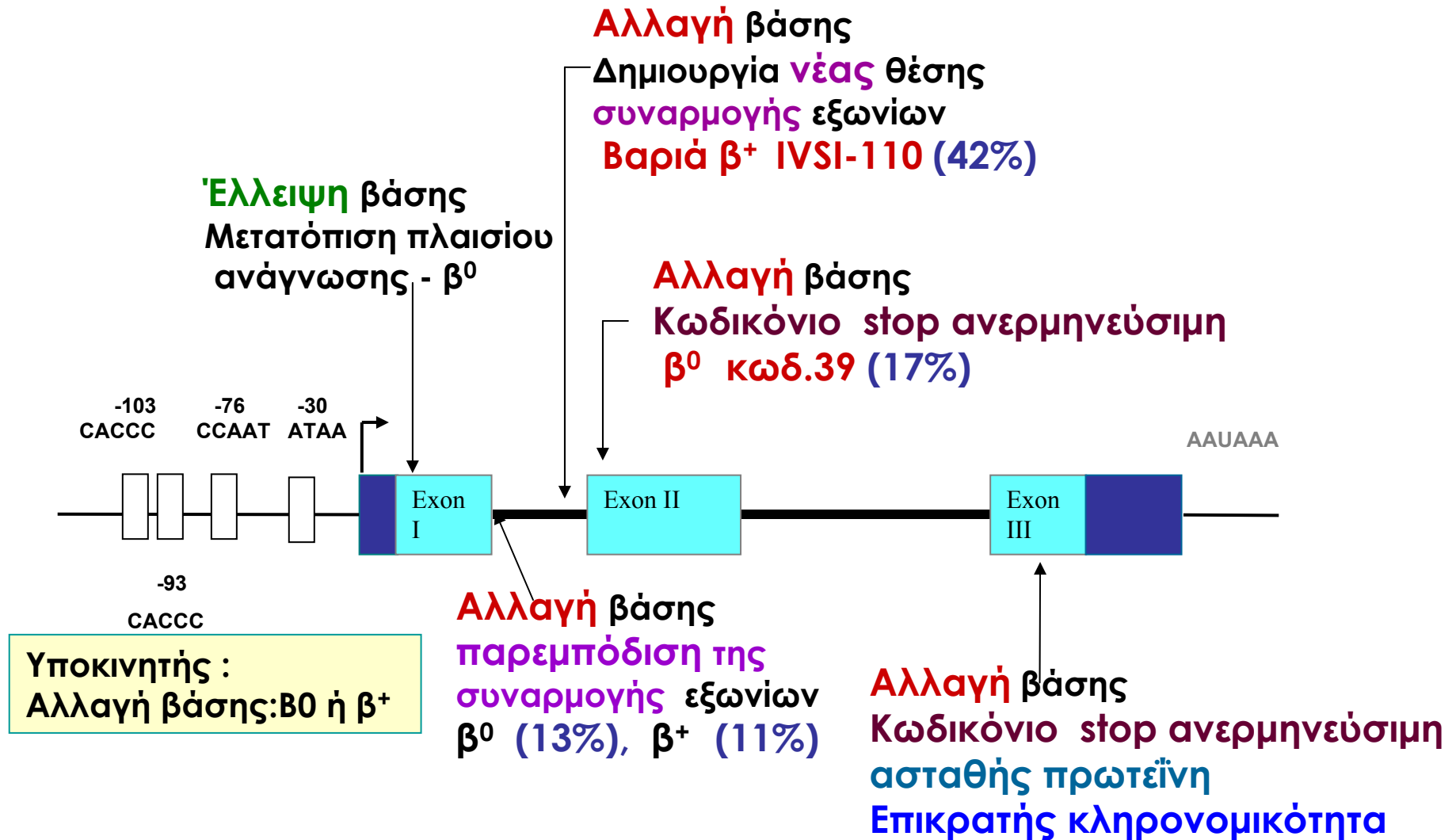
Αλλαγή βάσης A>T στο 6ο κωδικόνιο

➤ Αντικατάσταση του Glu από Val

➤ **HbS**



Μηχανισμοί δράσης των μεταλλάξεων β-Θαλασσαιμίας - οι πιο συχνές στο Ελλαδικό χώρο



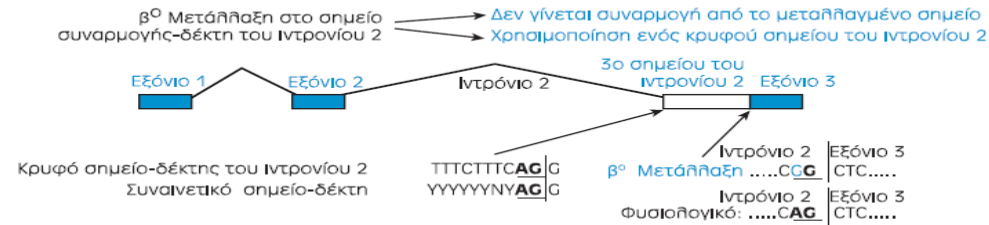
Εικόνα 11-12 ■ Παραδείγματα μεταλλάξεων που διαταράσσουν τη φυσιολογική συναρμογή του γονιδίου της β-σφαιρίνης και προκαλούν β-θαλασσαιμία.

A. Πρότυπο φυσιολογικής συναρμογής. **B.** Μία μετάλλαξη (IVS2-2A>G) στο φυσιολογικό σημείο συναρμογής-δέκτη του ιντρονίου 2 καταργεί τη φυσιολογική συναρμογή και οδηγεί σε χρήση ενός κρυφού σημείου-δέκτη του ιντρονίου 2. Αυτό το κρυφό σημείο ταιριάζει απόλυτα με τη συναινετική αλληλουχία του σημείου συναρμογής-δέκτη του ιντρονίου 2, το ανώμαλο mRNA που προκύπτει από την εναλλακτική συναρμογή του μεταλλαγμένου γονιδίου, έχει χάσει το σωστό ανοικτό πλαίσιο ανάγνωσης και δεν μπορεί να κωδικοποιήσει τη β-σφαιρίνη. **Γ.** Μία μετάλλαξη στο ιντρονίο 1 (G>A στη νουκλεοτιδική θέση 110), ενεργοποιεί ένα κρυφό σημείο-δέκτη σχηματίζοντας το δινουκλεοτίδιο AG και αυξάνει την ομοιότητα αυτής της αλληλουχίας με τη συναινετική αλληλουχία του σημείου συναρμογής-δέκτη. Έτσι, το mRNA της σφαιρίνης που προκύπτει είναι μεγαλύτερο σε μήκος (19 επιπλέον νουκλεοτίδια) στο άκρο 5' του εξονίου 2, ενώ ένα πρώιμο κωδικόνιο λήξης εισάγεται στο μετάγραφο. Αυτό προκαλεί την εκδήλωση φαινοτύπου β+-θαλασσαιμίας, καθώς η χρησιμοποίηση του φυσιολογικού σημείου-δέκτη λαμβάνει χώρα σε ποσοστό μόνο 10% σε σχέση με τα φυσιολογικά επίπεδα. **Δ.** Στην περίπτωση της Hb E, η παρερμηνεύσιμη μετάλλαξη (Glu26Lys) στο κωδικόνιο 26 του εξονίου 1 ενεργοποιεί ένα κρυφό σημείο-δέκτη στο κωδικόνιο 25, το οποίο ανταγωνίζεται αποτελεσματικά το φυσιολογικό σημείο. Επειδή η χρήση αυτού του εναλλακτικού σημείου-δέκτη δεν είναι τόσο συχνή, το μεγαλύτερο ποσοστό του RNA υφίσταται φυσιολογική συναρμογή, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ήπιας μορφής β+-θαλασσαιμίας.

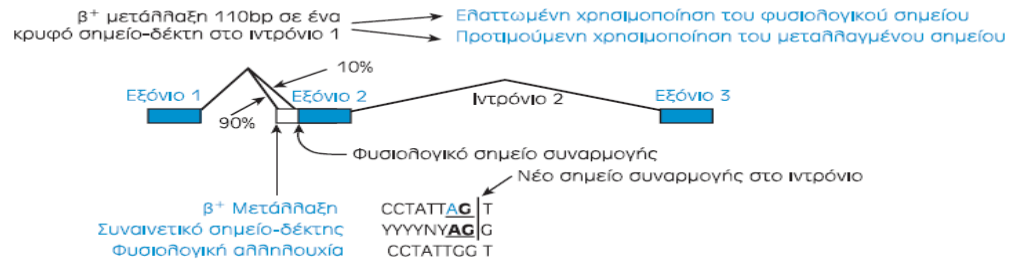
A Φυσιολογικό πρότυπο συναρμογής



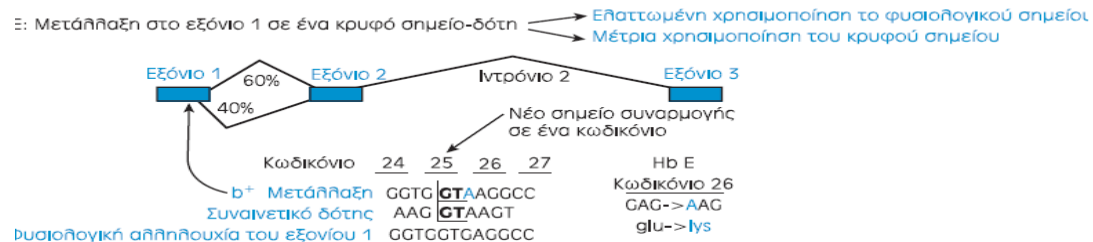
B Μετάλλαξη που καταστρέφει το φυσιολογικό σημείο συναρμογής-δέκτη και ενεργοποιεί ένα κρυφό σημείο



Γ Μετάλλαξη που οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου σημείου συναρμογής δέκτη σε ένα Ιντρόνιο



Δ Μετάλλαξη που ενδυναμώνει ένα κρυφό σημείο συναρμογής-δέκτη σε ένα εξόνιο



Η Παθογένεση στη β-θαλασσαιμία

Οι μεταλλάξεις β0 και β+, β-θαλασσαιμίας στο γονίδιο β-σφαιρίνης προκαλούν βλάβες στη ρύθμιση της έκφρασης δηλαδή:

1. Μεταλλάξεις του Υποκινητή :

Ελάττωση του ρυθμού ή της επάρκειας της μεταγραφής

2. Stop κωδικόνια, μικρές ελλείψεις σε κωδικόνια:

Ελάττωση/έλλειψη παραγωγής μηνύματος

3. Μεταλλάξεις σε ιντρόνια :

Βλάβη στη διαδικασία ωρίμανσης του μηνύματος
Ελάττωση/έλλειψη παραγωγής μηνύματος

4. Μεταλλάξεις στο 5' και στο 3' ακρο:

Ελάττωση στη βιωσιμότητα του μηνύματος

Όλες αυτές οι μεταλλάξεις έχουν ως αποτέλεσμα:

Ελάττωση/έλλειψη μηνύματος

Ελάττωση/έλλειψη β-αλύσου

Ο βαθμός της ελάττωσης εξαρτάται από τη θέση και τη φύση της αντίστοιχης μετάλλαξης

Συμπεράσματα:

1. Η α-Θαλασσαιμία οφείλεται κυρίως σε ελλείψεις του γονιδίου- α

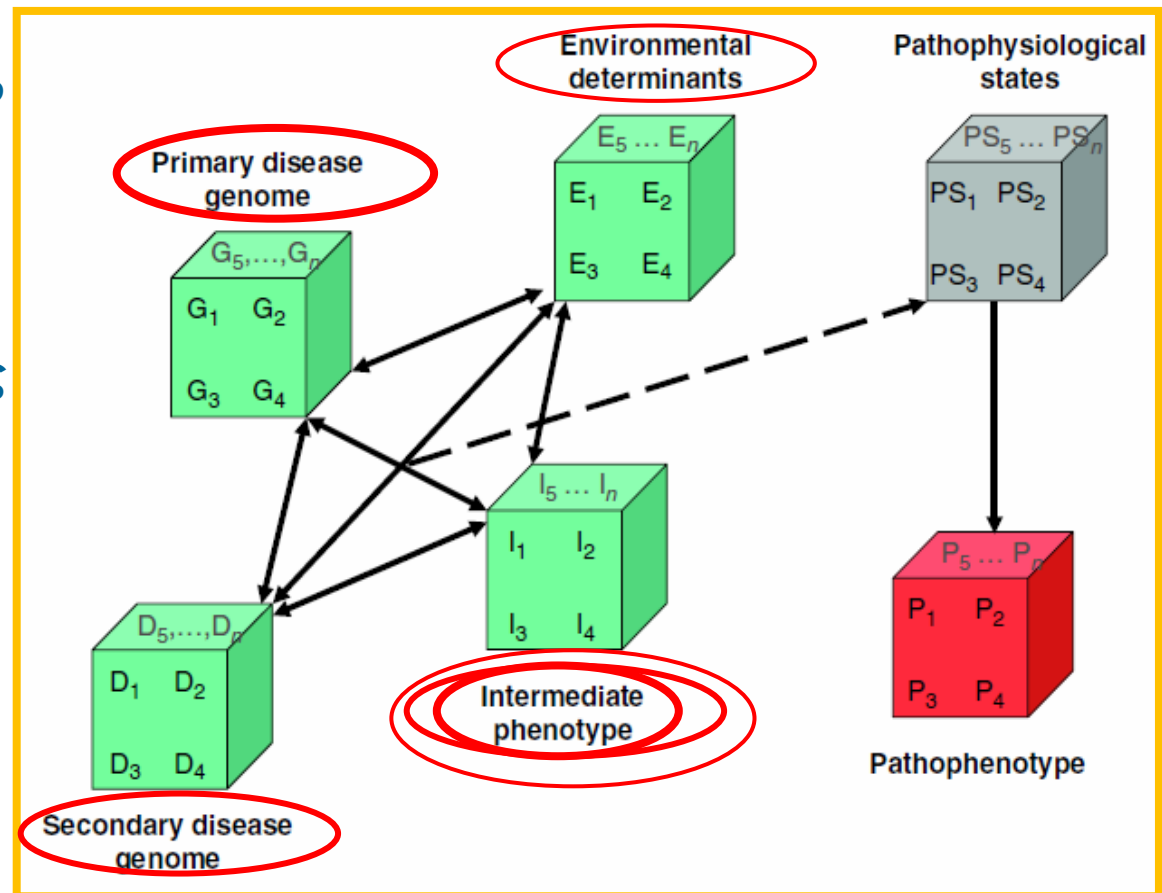
2. Η παρουσία κυρίως σημειακών μεταλλάξεων στο γονίδιο -β προκαλούν:

α. είτε δομικές παραλλαγές της αιμοσφαιρίνης

β. είτε β-θαλασσαιμία

Η βαρύτητα του κλινικού φαινοτύπου της β- θαλασσαιμίας εξαρτάται από:

- τη φύση της μετάλλαξης
- τη θέση της στο γονίδιο – β και τέλος από
- τις αλληλεπιδράσεις (πρωτογενείς, δευτερογενείς, περιβάλλον) που υφίσταται ο συγκεκριμένος γονότυπος στον καθένα οργανισμό



Συσχέτιση: κλινικής ετερογένειας ↔ γονοτυπικής ετερογένειας

φαινότυπος ↔ γονότυπος

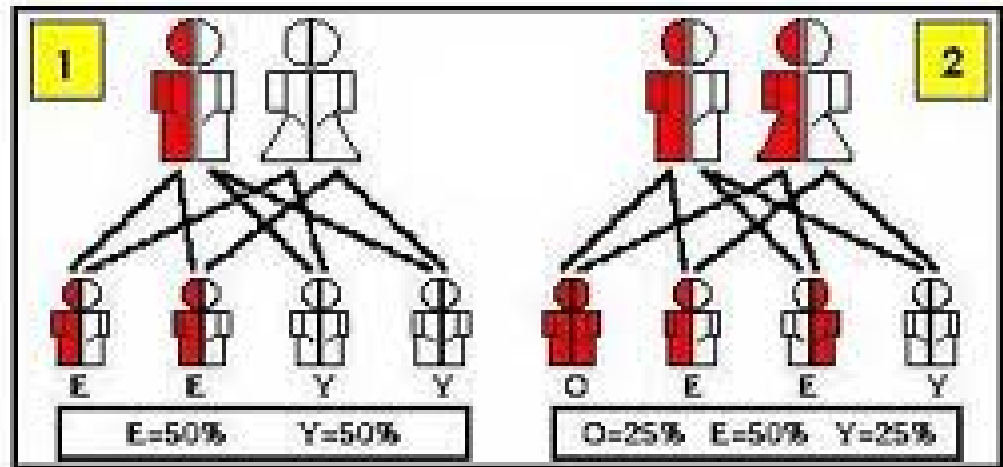
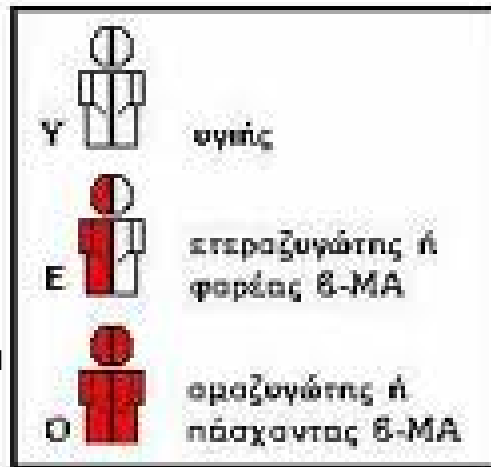
ΦΑΙΝΟΤΥΠΟΣ	ΓΟΝΟΤΥΠΟΣ	
	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ
Φυσιολογικός		αα/αα
Ετερόζυγος α-θαλασσαιμία 2 "σιωπηλός φορέας"		α-/αα
Ετερόζυγος α-θαλασσαιμία 1 "στίγμα α-θαλ"		--/αα
Φαινότυπος α-θαλασσαιμίας 1 στους Μαύρους Ομόζυγος για α-θαλασσαιμία 2 "στίγμα α-θαλ."		α-/α-
Νόσος HbH (HbH = β ₄)		α-/--
Εμβρυϊκός ύδρωπας με Hb του Bart (= γ ₄)		--/--

ΦΑΙΝΟΤΥΠΟΣ	ΓΟΝΟΤΥΠΟΣ β-ΓΟΝΙΔΙΟΥ
ΕΛΑΣΣΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΙΜΙΑ <i>Ασυμπτωματικός ετεροζυγώτης</i>	 β ⁰ ετεροζυγώτης ή β ⁺ ετεροζυγώτης
ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΘΑΛΑΣΣΑΙΜΙΑ <i>Συμπτωματικός, χωρίς ανάγκη μετάγγισης</i>	 Δύο ήπια αλληλόμορφα ή Ένα πολύ ήπιο αλληλόμορφο ή Συνυπάρχουσα α-θαλ. ή ΗΡFH
ΜΕΙΖΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΙΜΙΑ <i>Συμπτωματικός με ανάγκη μετάγγισης</i>	 β ⁰ -θαλασσαιμία ή β ⁺ -θαλασσαιμία

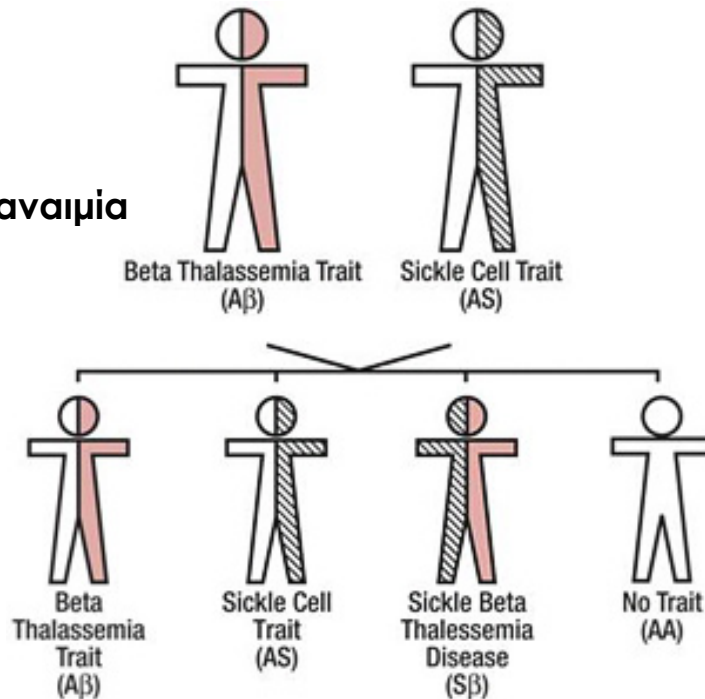
Κληρονóμηση του υπολειπόμενου παθολογικού γονιδίου- β

β- θαλασσαιμία

Ο ετεροζυγώτης ή φορέας ΔΕΝ πάσχει, αλλά φέρει ένα **παθολογικό** γονίδιο



β- θαλασσαιμία & δρεπανοκυτταρική αναιμία

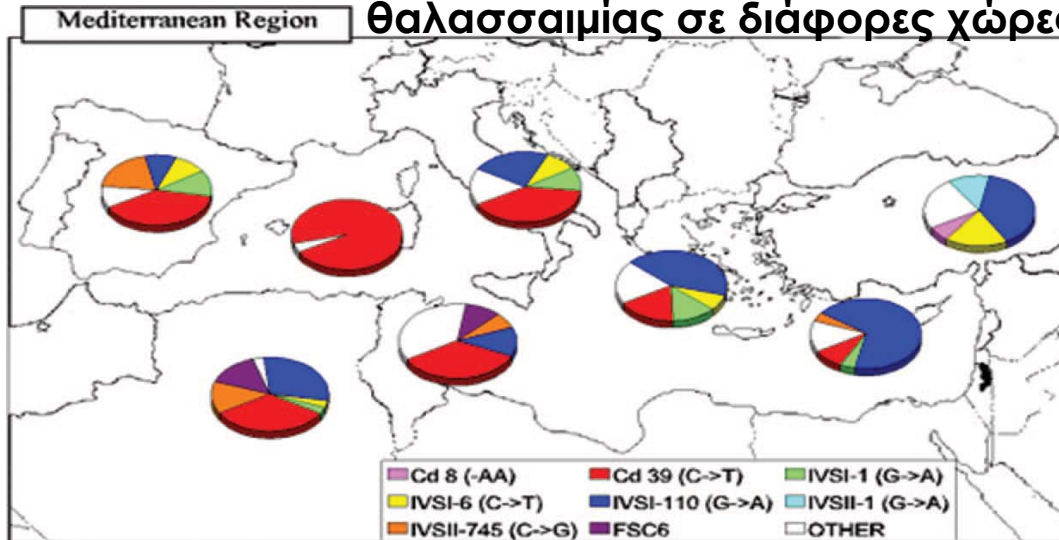


Τα θαλασσαιμικά σύνδρομα, ως **μονογονιδιακές κληρονομικές ασθένειες** ακολουθούν την υπολειπόμενη & σπάνια την επικρατή κληρονομικότητα

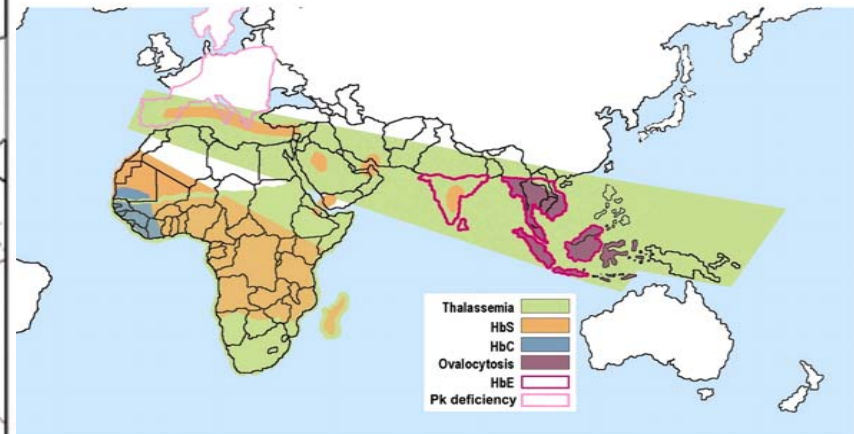
Οι αιμοσφαιρινιπάθειες αφορούν στο 5% του πληθυσμού της γης

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ :

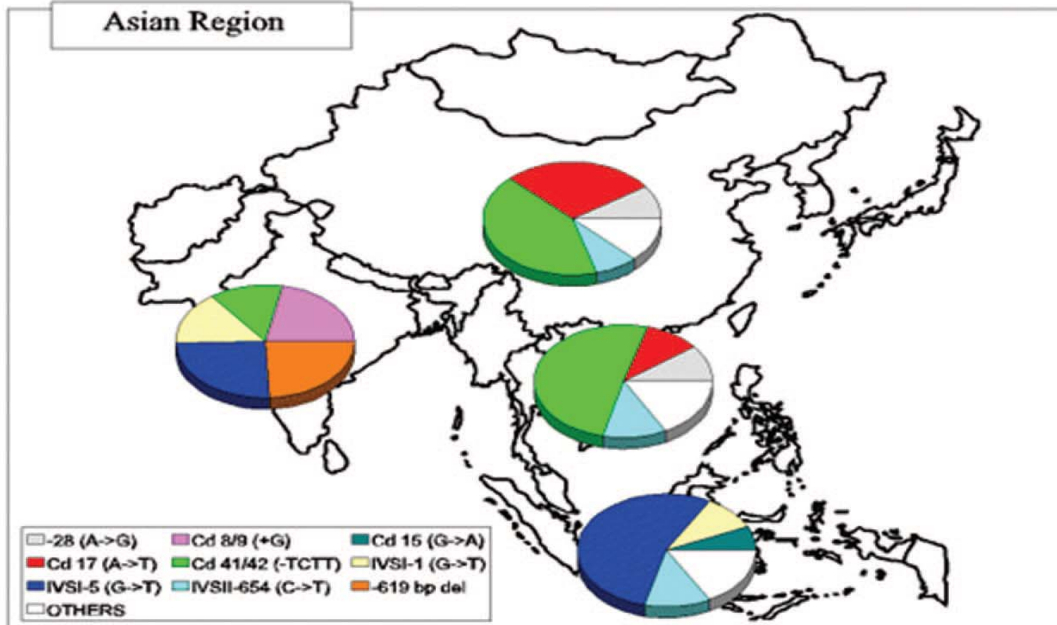
των συχνότερων μεταλλάξεων β-θαλασσαιμίας σε διάφορες χώρες



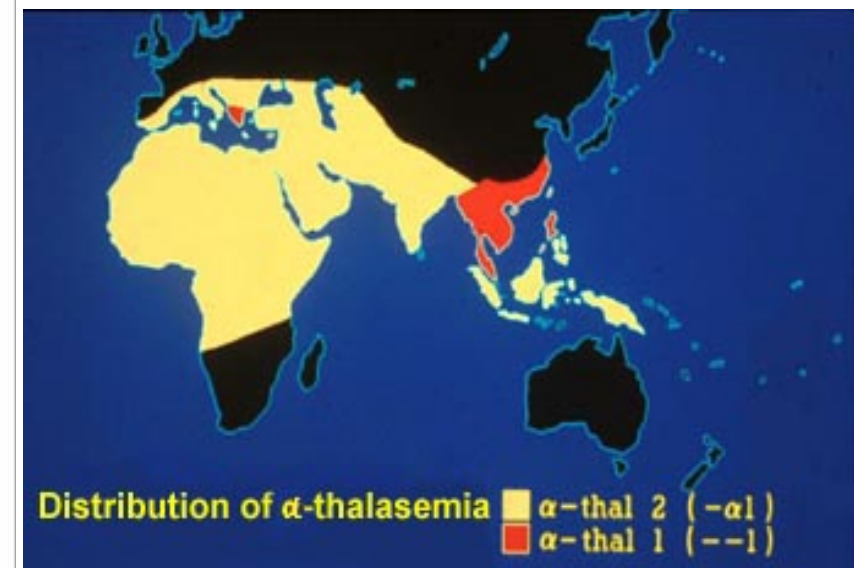
της β-θαλασσαιμίας & άλλων αιμοσφαιρινοπαθειών



Asian Region



της α-θαλασσαιμίας



Πίνακας 11-4 ■ Η μοριακή βάση της απλής β-θαλασσαιμίας

Τύπος	Παράδειγμα	Φαινότυπος	Προσβεβητημένος πληθυσμός
<u>ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΑ*</u>			
Ελλείμματα γονιδίου β-σφαιρίνης	Έλλειμμα 619 bp	β ⁰	Ινδοί
<u>ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΡΙΩΝ mRNA</u>			
Βλάβες στη συναρμογή (βλ. Εικ. 11-2)	Ανώμαλο σημείο-δέκτη στο ιντρόνιο 1: AG→GG	β ⁰	Αφρικανοί
Μεταηλλάξεις στον υποκινητή	Μετάλλαξη στο πλαίσιο ATA -31 -30 -29 -28 -31 -30 -29 -28 A T A A → G T A A	β ⁺	Ιάπωνες
Ανώμαλη θέση καλύπτρας του mRNA	A → C στη θέση της καλύπτρας του mRNA	β ⁺	Ασιάτες
Ανωμαλία στη θέση πολυαδενυλίωσης	AATAAA → AACAAA	β ⁺	Αφρικανοί
<u>ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΜΟΡΙΑ mRNA</u>			
Ανερμηνεύσιμες μεταηλλάξεις	Κωδικόνιο 39 Gln → Stop CAG → UAG Κωδικόνιο 16 (έλλειμμα 1 bp) <i>Φυσιολογικό:</i> trp gly lys val asn 15 16 17 18 19 UGG GGC AAG GUG AAC UGG GCA AGG UGA <i>Μεταλλαγμένο:</i> trp ala arg stop	β ⁰	Μεσογειακοί πληθυσμοί (κυρίως από τη Σαρδηνία)
Μεταηλλάξεις μετατόπισης πλαισίου ανάγνωσης		β ⁰	Ινδοί
<u>ΜΕΤΑΛΛΑΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΩΔΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΟΥ, ΕΠΙΣΗΣ, ΤΡΟΠΟΠΟΙΟΥΝ ΤΗ ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ*</u>			
Συνώνυμες μεταηλλάξεις	Κωδικόνιο 24 Gly → Gly GGU → GGA	β ⁺	Αφρικανοί

Κατάταξη των β- αιμοσφαιρινοπαθειών με βάση τον κλινικό φαινότυπο

Κατηγορία παραλλαγών*	Μοριακή βάση της μετάλλαξης	Αλληλαγή στο πολυπεπίδιο	Παθοφυσιολογικές συνέπειες της μετάλλαξης	Κληρονόμηση
Παραλλαγές που προκαλούν αιμολυτική αναιμία				
<u>ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΕΣ ΜΕ ΝΕΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</u>				
Hb S	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: Glu6Val	Πολυμερισμός της μη οξυγονωμένης Hb S → δρεπανοκύτταρα → αγγειακή απόφραξη και αιμόλυση	Αυτοσωματική υπολειπόμενη
Hb C	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: Glu6Lys	Η οξυγονωμένη Hb C έχει την τάση να κρυσταλλώνεται → λιγότερο εύκαμπτα κύτταρα → ήπια αιμόλυση Οι σύνθετοι ετεροζυγώτες Hb S/Hb C παρουσιάζουν ήπια δρεπανοκυτταρική αναιμία	Αυτοσωματική υπολειπόμενη
<u>ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΕΣ</u>				
Hb Hammersmith	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: Phe42Ser	Ασταθής αιμοσφαιρίνη κατακρήμνιση → αιμόλυση και χαμηλή συγγένεια για το οξυγόνο	Αυτοσωματική επικρατής
Αιμοσφαιρίνες με τροποποιημένη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου				
Hb Hyde Park (μεθαιμοσφαιρίνη)	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: His92Tyr	Ο οξειδωμένος σίδηρος της αίμης καθίσταται ανθεκτικός στην αναγωγή της μεθαιμοσφαιρίνης → Hb M, που δεν έχει την ικανότητα να μεταφέρει οξυγόνο → κυάνωση (ασυμπτωματικό)	Αυτοσωματική επικρατής
Hb Kempsey	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: Asp99Asn	Η μετάλλαξη διατηρεί την αιμοσφαιρίνη στην υψηλής συγγένειας για το οξυγόνο μορφή → μειωμένο οξυγόνο στους ιστούς → πολυκυτταραιμία	Αυτοσωματική επικρατής
Παραλλαγές που οδηγούν σε φαινότυπο θαλασσαιμίας*				
Hb E	Μονονουκλεοτιδική αντικατάσταση	β-αλυσίδα: Glu26Lys	Μετάλλαξη → ανώμαλη Hb και μειωμένη σύνθεση (ανώμαλη συναρμογή RNA) → ήπια θαλασσαιμία (βλ. Εικ. 11-12)	Αυτοσωματική υπολειπόμενη
*Οι παραλλαγές της αιμοσφαιρίνης συνήθως ονομάζονται από την πόλη καταγωγής των ασθενών στους οποίους περιγράφηκαν για πρώτη φορά				
*Επιπρόσθετες δομικές παραλλαγές που προκαλούν β-θαλασσαιμία παρουσιάζονται στον Πίνακα 11-4.				