

2 Η φυσιολογική αγγείωση των οστών και η νεοαγγείωση των καταγμάτων

Χρήστος Κ. Γιαννακόπουλος

Το κυκλοφορικό σύστημα των οστών αποτελεί τμήμα του καρδιαγγειακού συστήματος, αλλά παρουσιάζει πολλές ιδιαιτερότητες εξαιτίας της αποστολής του, να μεταφέρει, δηλαδή, οξυγόνο και μεταβολίτες σε έναν αποπιτανωμένο ιστό και ταυτόχρονα να αρδεύει και τον μυελό των οστών στον οποίο παράγονται τα έμμορφα στοιχεία του αίματος.

Η άρδευση και η μικροκυκλοφορία του σκελετού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιτέλεση του μεταβολικού και λειτουργικού έργου του οστίτη ιστού, επηρεάζεται σημαντικά σε διάφορες παθολογικές καταστάσεις και έχει μεγάλη σημασία για την ανταλλαγή φαρμακευτικών ουσιών και μεταβολιτών. Η αγγείωση του οστίτη ιστού είναι επίσης αναγκαία για την ομαλή εξέλιξη της οστικής εναλλαγής και για την επιδιόρθωση των μικροτραυματισμών που οφείλονται στην καταπόνηση του οστού.

Ο οστικός μεταβολισμός, όπως εκφράζεται από τον ρυθμό οστικής εναλλαγής, είναι υψηλότερος σε περιοχές σπογγώδους οστού που περικλείουν ερυθρό μυελό, σε σχέση με περιοχές που περιβάλλονται από κίτρινο, λιπώδη μυελό. Διαταραχές στην αγγείωση των οστών έχουν ενοχοποιηθεί σε καταστάσεις όπως η άσηπτη οστεονέκρωση, η οστεοπόρωση, η νόσος Paget κ.λπ., ενώ η πρόσβαση ενός φαρμάκου σε μία πτωχά αγγειούμενη περιοχή του οστού είναι ανεπαρκής. Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της οστεοβλαστικής δραστηριότητας και της αιματικής ροής στο οστόν.

Η αγγείωση των οστών δεν έχει περιγραφεί με με-

γάλη λεπτομέρεια στον άνθρωπο λόγω της ειδικής κατασκευής του οστίτη ιστού. Οι περισσότερες μέθοδοι μελέτης απαιτούν αφαίρεση και καταστροφή του οστού, ενώ οι μη παρεμβατικές μέθοδοι έχουν περιορισμένη ακρίβεια.

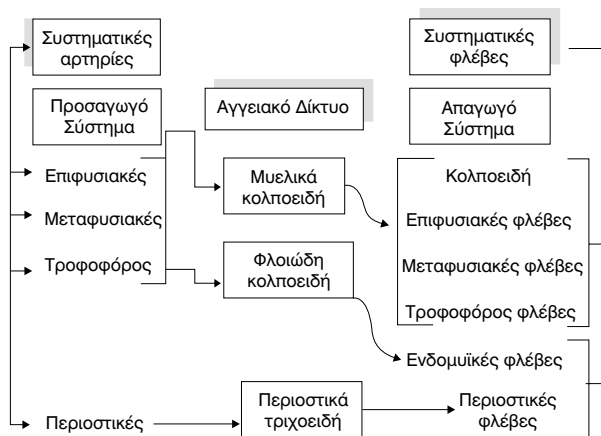
2.1 Ανατομική περιγραφή της αγγείωσης των οστών

Το αγγειακό δίκτυο των οστών παρουσιάζει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λόγω της αποπιτανωμένης φύσης του οστίτη ιστού. Η αγγείωση των οστών μπορεί να μελετηθεί με ποιοτικές ή ποσοτικές, παρεμβατικές ή μη μεθόδους. Οι περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αγγείωση των οστών προέρχονται από πειραματόζωα, κυρίως επίμυες, κονίκλους και σκύλους και έχουν ληφθεί με την τεχνική έγχυσης ραδιενεργά σεσημασμένων σφαιριδίων και τη μικροαγγειογραφία. Οι πληροφορίες σχετικά με την αγγείωση των μακρών οστών του ανθρώπου είναι σχετικά περιορισμένες. Η αγγείωση των οστών στον άνθρωπο μπορεί να μελετηθεί ποσοτικά και ποιοτικά με το σπινθηρογράφημα οστών τριών φάσεων στο οποίο χορηγείται τεχνήτιο-99m, αλλά η ακριβής συσχέτιση της πρόσληψης ραδιοφαρμάκου και της αγγείωσης του οστού παραμένει αδιευκρίνηστη. Άλλες, περισσότερο σύγχρονες, τεχνικές είναι η τομογραφία ποζιτρονίων, όπου χορηγείται ραδιενεργά σεσημασμένο ύδωρ και η χρήση power Doppler.

Η αιμάτωση των οστών δεν είναι αμελητέα. Τα

Προσαγωγός αγγείωση	Ενδοοστική αγγείωση	Φλεβική αποχέτευση
Επιφυσιακές αρτηρίες Μεταφυσιακές αρτηρίες	Μυελικά κολποειδή	Κόλποι συλλογής Επιφυσιακές-Μεταφυσιακές φλέβες Τροφοφόρος και αποχετευτικές φλέβες
Τροφοφόρος αρτηρία Περιοστικές αρτηρίες	Φλοιώδη κολποειδή Περιοστικά τριχοειδή	Ενδομυϊκές και ενδοτενόντιες φλέβες Περιοστικές φλέβες

Πίν. 2.1: Το αγγειακό δίκτυο των οστών διακρίνεται στο προσαγωγό αρτηριακό δίκτυο, στο ενδοοστικό αγγειακό πλέγμα και στο απαγωγό φλεβικό δίκτυο.



Εικ. 2.1: Το σύστημα άρδευσης των οστών συνοπτικά.

οστά υπό φυσιολογικές συνθήκες καταναλώνουν το 7-10% της καρδιακής παροχής, μέγεθος το οποίο μπορεί να αυξηθεί σε διάφορες φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις. Η μέση ογκομετρική ροή στον άνθρωπο είναι 5 ml/sec, ενώ η αγγείωση ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων ζωικών ειδών αλλά και μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του ίδιου οστού. Σε γενικές γραμμές η αιμάτωση των κάτω άκρων υπερτερεί αυτής των άνω. Η ροή στις επιφύσεις και στις μεταφύσεις κονίκλων με αυξημένη δραστηριότητα είναι αυξημένη σε σχέση με τις επιφύσεις και τις μεταφύσεις ζώων με μικρή δραστηριότητα, καθώς επίσης η ροή στη διάφυση ανώριμων ζώων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των ωρίμων. Η αγγείωση του οστού οφείλει να είναι αποτελεσματική, έτσι ώστε κανένα οστικό κύτταρο να μην βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 300 μm από το πλησιέστερο αιμοφόρο αγγείο προκειμένου να μπορέσει να επιτελέσει τη λειτουργία του.

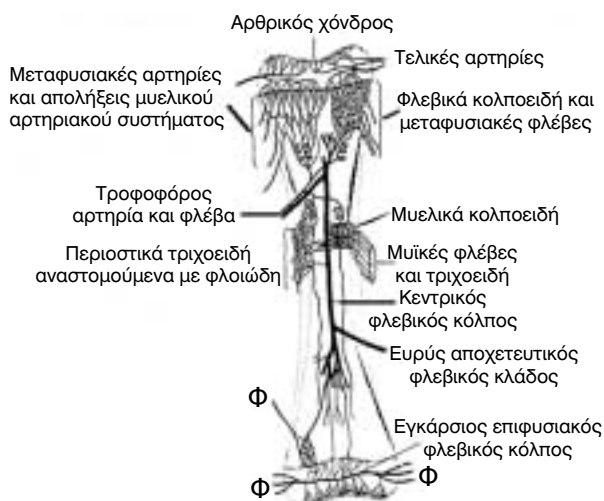
Από λειτουργική άποψη το αγγειακό δίκτυο των οστών παρουσιάζει τρία επίπεδα οργάνωσης: το προσαγωγό αρτηριακό σύστημα, το ενδιάμεσο σύστημα ανταλλαγής και το απαγωγό φλεβικό σύστημα (Πίν. 2.1). Σε γενικές γραμμές, η αγγείωση ενός μακρού οστού πραγματοποιείται από τέσσερα αρτηριακά δίκτυα: το επιφυσιακό, το μεταφυσιακό, το περιοστικό και το δίκτυο της τροφοφόρου αρτηρίας (Εικ. 2.1). Τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν αναστομώσεις σε φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις και αναπτύχθηκαν φυλογενετικά εξαιτίας του μηχανισμού της ενδοχόνδριας οστεογένεσης με τον οποίο δημιουργούνται τα μακρά οστά.

Η *επιφυσιακή αρτηρία* πορεύεται στο υποχόνδριο, αρδεύει την επίφυση και τον συζευκτικό χόνδρο, ενώ επί διακοπής της ροής της η επίφυση υφίσταται ισχαιμική νέκρωση, όπως συμβαίνει στη νόσο Legg-Perthes-Calvé στην οποία παρουσιάζεται νέκρωση της άνω μηριαίας επίφυσης. Οι επι-

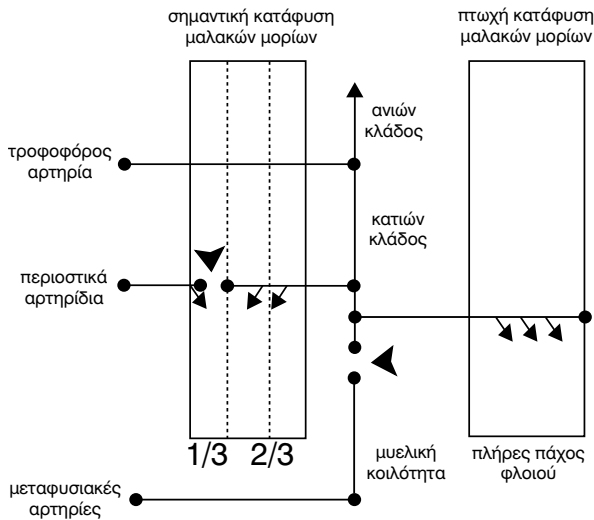
φυσιικοί κλάδοι δεν διαπερνούν τον συζευκτικό χόνδρο, ενώ στην επιφυσιο-μεταφυσιική περιοχή σχηματίζεται ο αγγειακός δακτύλιος Hunter μεταξύ αναστομωτικών κλάδων των δύο όμορων αγγειακών δικτύων.

Οι *μεταφυσιακές αρτηρίες* είναι πολλαπλές και αρδεύουν τη μετάφυση των οστών και τον συζευκτικό χόνδρο, παρουσιάζοντας, όμως, αναστομώσεις με τα όμορα αγγειακά δίκτυα. Υπό φυσιολογικές συνθήκες η επικοινωνία είναι μικρή, αλλά σε κατάγματα η συνεισφορά του μεταφυσιακού δικτύου στο σύστημα της διάφυσης είναι σημαντική. Το *περιοστικό δίκτυο* αποτελείται από αρτηρίες που πορεύονται μεταξύ του περιοστέου και του μυϊκού περιβλήματος με το οποίο και επικοινωνούν, είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένο στις θέσεις πρόσφυσης συνδέσμων ή περιτονιών και μπορεί να χορηγεί κλάδους που αρδεύουν έως το ένα τρίτημόριο του πάχους του φλοιού. Σε περιοχές του φλοιού όπου η πρόσφυση των μαλακών μορίων είναι μικρή, η άρδευση του φλοιού γίνεται αποκλειστικά από το σύστημα της τροφοφόρου αρτηρίας. Το περιοστικό δίκτυο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν συνεισφέρει σημαντικά στην αγγείωση των οστών, αλλά αποκτά μεγάλη σημασία σε παθολογικές καταστάσεις και σε κατάγματα, οπότε αναπτύσσεται σε μεγάλο βαθμό και συμμετέχει στην αγγείωση του οστού. Η αποκόλληση του περιοστέου μετά από κάταγμα ή κατά τη χειρουργική προσπέλαση μειώνει σημαντικά την περιοστική αγγείωση (Εικ. 2.2).

Το δίκτυο της *τροφοφόρου αρτηρίας* αποτελείται από μία ή περισσότερες αρτηρίες, κλάδους μειζόνων αρτηριακών στελεχών, που διέρχονται από τρήματα που έχουν φορά 45°-60° ως προς τον επιμήκη άξονα του οστού (Εικ. 2.3). Η διακύμαν-



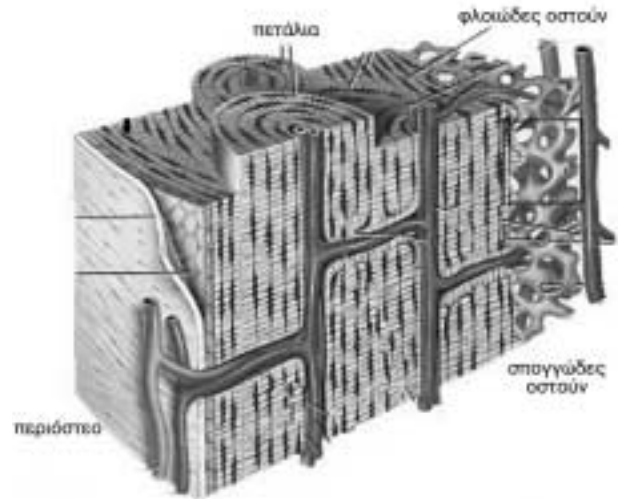
Εικ. 2.2: Το αρτηριακό και το φλεβικό δίκτυο των μακρών οστών, σύμφωνα με τον Brookes.



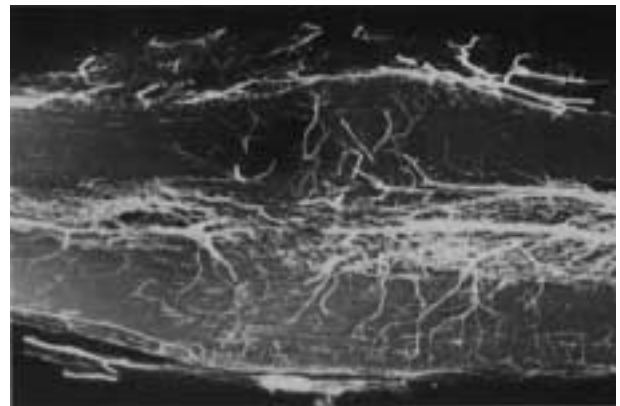
Εικ. 2.3: Η αρτηριακή άρδευση της διάφυσης ενός μακρού οστού. Η τροφοφόρος αρτηρία διχάζεται σε έναν ανιόντα και έναν κατιόντα κλάδο, οι οποίοι αρδεύουν το ενδόστεο και τον φλοιό. Όπου υπάρχει σημαντική πρόσφυση συνδέσμων και τενόντων μέρος του φλοιού αρδεύεται από περιστικά αρτηρίδια (αριστερό ήμισυ σχήματος), ενώ όπου δεν υπάρχουν σημαντικές προσφύσεις (δεξιό ήμισυ της εικόνας) ο φλοιός αρδεύεται αποκλειστικά από το ενδομυελικό δίκτυο.

ση της θέσης εισόδου είναι μεγάλη. Τα περισσότερα τρήματα που διαπιστώνονται στην επιφάνεια των οστών χρησιμεύουν όμως στη δίοδο φλεβικών κλάδων. Στο μηριαίο οστού η τροφοφόρος αρτηρία είναι κλάδος της δεύτερης διατιτρώσας μηριαίας αρτηρίας και στην κνήμη κλάδος της οπίσθιας κνημιαίας αρτηρίας. Στη μυελική κοιλότητα η τροφοφόρος αρτηρία διχάζεται σε έναν ανιόντα και έναν κατιόντα κλάδο με κατεύθυνση προς τις επιφύσεις. Από τους κλάδους αυτούς προέρχονται αρτηρίδια τα οποία αρδεύουν τον μυελό, το ενδόστεο και τη διάφυση. Τα αρτηρίδια του φλοιού πορεύονται μεμονωμένα ή σε ομάδες των 2-6 αρτηριδίων κάθετα ως προς τον άξονα της διάφυσης και εισέρχονται στους αβέρσειους σωλήνες. Τα τριχοειδή αγγεία του φλοιού αποχετεύουν στο περιστικό και όχι στο ενδοστικό φλεβικό δίκτυο (Εικ. 2.4).

Στον μυελό των οστών η αγγείωση είναι ιδιαίτερα αυξημένη με την παρουσία κολποειδών με ασυνεχή τοιχώματα, προκειμένου να διευκολύνεται η διαπίδυση κυτταρικών στοιχείων (Εικ. 2.5). Στα κολποειδή η βασική μεμβράνη μπορεί να είναι ατελής ή και να απουσιάζει πλήρως και γι' αυτό τον λόγο μεταστατικές εστίες απαντώνται κυρίως σε θέσεις όπου υπάρχει ερυθρός μυελός. Η αγγείωση του κίτρινου μυελού είναι πολύ μικρότερη και τα κολποειδή έχουν συνεχή βασική μεμβράνη. Αντίστοιχα, το σπογγώδες οστού σε περιοχές ερυθρού μυελού παρουσιάζει αυξημένο ρυθμό ανα-



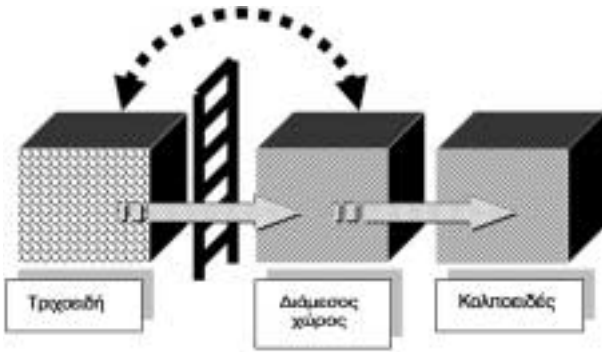
Εικ. 2.4: Η αγγείωση των συστημάτων Havers και η επικοινωνία μεταξύ του ενδοστικού και του περιστικού αγγειακού δικτύου.



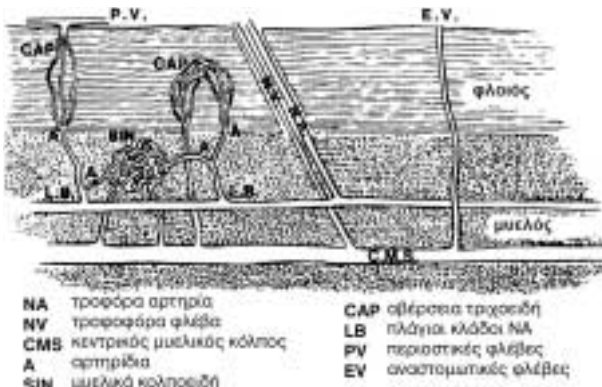
Εικ. 2.5: Ακτινογραφία οστού σκύλου μετά από ενδαγγειακή έγχυση βαρίου. Παρουσιάζεται το πλούσιο ενδομυελικό δίκτυο και οι κάθετοι κλάδοι που αρδεύουν το φλοιώδες οστού.

κατασκευής σε σχέση με περιοχές κίτρινου μυελού. Σε κλινικές μελέτες η χορήγηση παραθορμόνης παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση της οστικής πυκνότητας στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης, όπου κυριαρχεί ο ερυθρός μυελός, σε σχέση με το άνω πέρας του μηριαίου, όπου κυριαρχεί ο κίτρινος μυελός.

Οι αρτηρίες στα οστά έχουν μέγεθος >50 μm, οι φλέβες >60 μm, τα αρτηρίδια 10-50 μm, τα φλεβικά κολποειδή 10-60 μm και τα τριχοειδή <10 μm. Η αγγείωση των οστών, ιδίως η μυελική, μειώνεται με την ηλικία, ενώ η περιστική αιμάτωση αυξάνει. Το τριχοειδικό δίκτυο που υπάρχει μεταξύ των δοκίδων του σπογγώδους οστού αρδεύει τις δοκίδες, με εξαίρεση τις δοκίδες μεγέθους <200



Εικ. 2.6: Ο φραγμός αίματος-οστού. Η μεταφορά ουσιών γίνεται μέσω του διάμεσου χώρου και της κίνησης του διάμεσου υγρού.



Εικ. 2.7: Το αγγειακό δίκτυο του φλοιώδους οστού, όπως έχει περιγραφεί σε σκύλους. Διακρίνονται η τροφοφόρος αρτηρία και φλέβες, ο κεντρικός μυελικός κόλπος, τα κολλοειδή του μυελού και οι αναστοματικές φλέβες.

μη που διατρέφονται με διάχυση.

Στον οστίτη ιστό παρατηρείται ένας φραγμός αίματος-οστού (Εικ.2.6). Για να φθάσει στον οστίτη ιστό ένας μεταβολίτης ή ένα φάρμακο θα πρέπει να μεταφερθεί δια της ενδοθηλιακής μεμβράνης του τριχοειδούς στον διάμεσο χώρο και κατόπιν θα πρέπει να παρακάμψει τον φραγμό των επενδυματικών οστικών κυττάρων. Για να φθάσει στη συνέχεια σε μία αποτιτανωμένη περιοχή θα πρέπει να διαπεράσει μία ζώνη μη επιμεταλλωμένης θεμέλιας ουσίας και πρωτεογλυκανών, ενώ η περαιτέρω διείσδυση θα γίνει μέσω του δικτύου των μικροσωληνίσκων και της ροής του διάμεσου υγρού.

Με τη μέθοδο έκπλυσης ραδιοσημασμένης αντιπυρίνης σε σκύλους διαπιστώθηκε ότι το 70% της ροής της τροφοφόρου αρτηρίας ανταλλάσσεται εντός του φλοιώδους οστού και το 30% εντός του μυελού. Με την τεχνική έγχυσης σεσημασμένων μικροσφαιριδίων διαπιστώθηκε ότι στο μηριαίο επιμύων ηλικίας δύο ετών ο μυελός δέχεται το 90% του όγκου αίματος και ο φλοιός μόνο

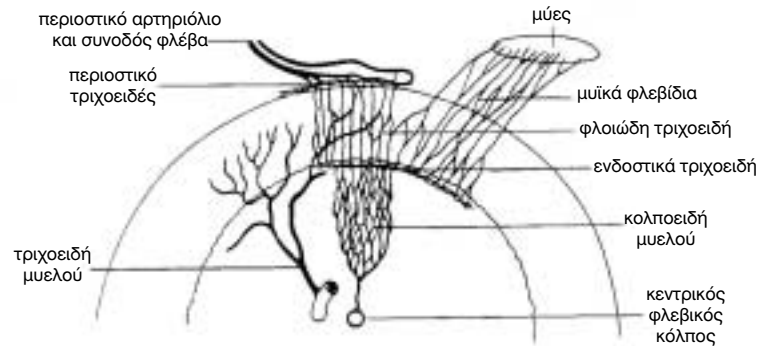
το 10%. Στο ώριμο οστού η κατεύθυνση της αιματικής ροής είναι φυγόκεντρη λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ αρτηριακού και φλεβικού δικτύου (Εικ. 2.7). Εάν διακοπεί το σύστημα της τροφοφόρου αρτηρίας, η ροή αναστρέφεται και γίνεται κεντρομόλος, τροφοδοτούμενη τόσο από τις περιοστικές, όσο και από τις μεταφυσιακές αρτηρίες. Στο αναπτυσσόμενο οστού η ροή είναι κεντρομόλος εξαιτίας της σημαντικής αγγείωσης του περιοστίου.

Το φλεβικό δίκτυο αρχίζει να σχηματίζεται από πολλαπλά φλεβικά κολλοειδή τα οποία συνενώνονται σχηματίζοντας τον επιμήκως κατευθυνόμενο κεντρικό φλεβικό κόλπο (Εικ. 2.8). Από εκεί προέρχονται πολλαπλά φλεβικά στελέχη τα οποία είτε διαπερνούν τον φλοιό και παροχετεύουν στο περιοστικό φλεβικό δίκτυο είτε οδηγούν στις τροφοφόρες φλέβες οι οποίες εξέρχονται του οστού από τα ομώνυμα τρήματα. Οι τροφοφόρες φλέβες αποχετεύουν μόνο το 10% του αίματος που φθάνει στο οστού. Η αποχέτευση των μεταφύσεων γίνεται από τις πολυάριθμες μεταφυσιακές φλέβες και φλεβίδια που συνοδεύουν τις μεταφυσιακές αρτηρίες.

Το αγγειακό δίκτυο του οστού παρομοιάζεται με μία δεξαμενή νερού με ένα στόμιο εισροής και ένα εκροής. Η απόφραξη του ενός ή του άλλου στόμίου οδηγεί σε συσσώρευση αίματος εντός του οστού. Η χωρητικότητα του φλεβικού δικτύου του οστού είναι 6-8 φορές μεγαλύτερη του αρτηριακού δικτύου εξαιτίας της διατασιμότητάς του. Δεν έχει περιγραφεί η παρουσία εξειδικευμένου λεμφικού συστήματος στο οστού, αλλά αφού η προσαγωγή υγρών είναι μεγαλύτερη από τη φλεβική απορροή, είναι ζωτικής σημασίας η ύπαρξη κάποιου είδους λεμφικού αποχετευτικού συστήματος. Το προλεμφικό σύστημα των οστών παροχετεύει πρωτεΐνες και άλλες ουσίες από τον διάμεσο χώρο των οστών στο περιοστικό δίκτυο.

2.2 Ρύθμιση της αγγείωσης των οστών

Η αιματική ροή στα οστά ρυθμίζεται από ανατομικούς, μηχανικούς, νευρικούς, χυμικούς και μεταβολικούς παράγοντες. Τα αγγεία των οστών διαθέτουν διάφορους υποδοχείς, κυρίως α_1 αδρενεργικούς υποδοχείς, η σημασία των οποίων δεν είναι απολύτως γνωστή. Σε ισχαιμία χάνεται ο συμπαθητικός τόνος που οφείλεται στο περιαγγειακό συμπαθητικό νευρικό δίκτυο και αυξάνει η ευαισθησία των α_1 και α_2 αδρενεργικών υποδοχέων στις κυκλοφορούσες κατεχολαμίνες. Η φαρμακευτική τροποποίηση της δράσης τους και η ενδεχόμενη αύξηση της αιματικής ροής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον σε οστικές νόσους, στις οποίες η μείωση της αγγείωσης α-



Εικ. 2.8: Το δίκτυο φλεβικής απορροής του οστού περιλαμβάνει τον κεντρικό φλεβικό κόλπο, τις τροφοφόρες φλέβες, τα τριχοειδή και κολποειδή του μυελού και τις αναστοματικές φλέβες που συνδέουν το μυελικό με το περισοστικό φλεβικό δίκτυο. Η χωρητικότητα του φλεβικού δικτύου είναι πολλαπλάσια του αρτηριακού.

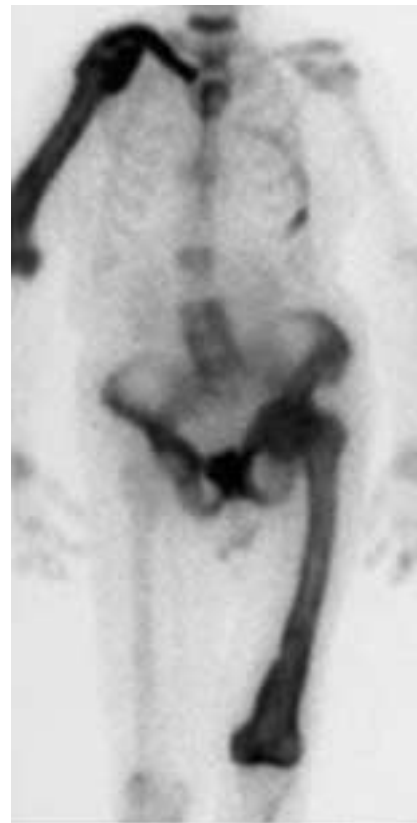
ποτελεί πρωταρχικό αιτιοπαθογενετικό παράγοντα (οστεονέκρωση, όγκοι, ψευδαρθρώσεις).

Το σκελετικό σύστημα δέχεται σε συνθήκες ηρεμίας το 17% (5-27%) της καρδιακής παροχής, η μέση ογκομετρική ροή σε ανθρώπους είναι 12 ml/sec/100 gr, ενώ στους επίμυες οι αντίστοιχες τιμές είναι 10 και 20 ml/sec/100 gr, αντίστοιχα. Η αιματική ροή στο οστούν αυξάνει κατά την άσκηση και σε περίπτωση κατάγματος (κατά 6.6 φορές), ενώ μειώνεται με την αύξηση της ηλικίας λόγω της αύξησης της οστικής αγγειακής αντίστασης με ταυτόχρονη μετατόπιση της ροής προς το σπογγώδες οστούν. Η ροή του αίματος αυξάνει σημαντικά σε οστικές παθήσεις όπως είναι η νόσος Paget (Εικ. 2.9), όπου η συγκέντρωση ραδιοφαρμάκου στο σπινθηρογράφημα μπορεί να είναι αυξημένη κατά έξι φορές. Η ροή του αίματος αυξάνει επίσης με την υποξία, όπως συμβαίνει σε μεγάλο υψόμετρο, την υπερκαπνία, την αύξηση της θερμοκρασίας και τη συμπαθεκτομή. Η χορήγηση μεθυλπρεδνιζολόνης μειώνει σημαντικά την οστική αιματική ροή, γεγονός που μπορεί να ενέχεται στην αιτιοπαθογένεια της οστεονέκρωσης. Η χορήγηση προσταγλανδινών αυξάνει την άρδευση, ενώ το κάπνισμα τη μειώνει.

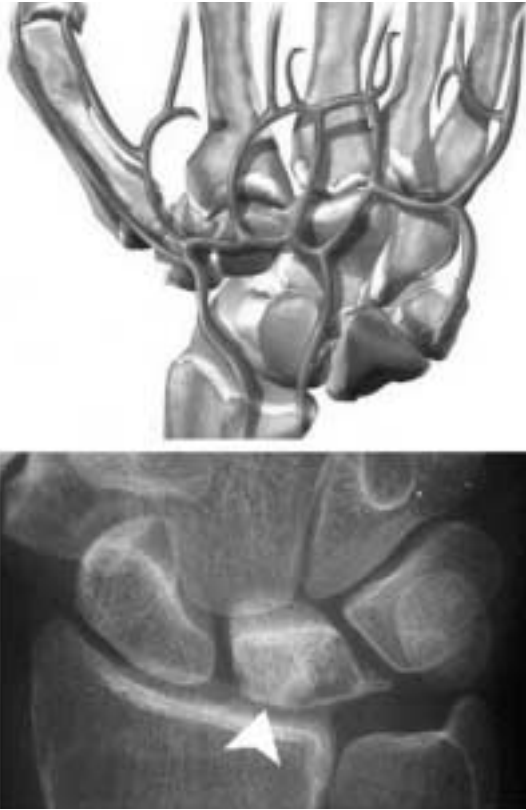
Παράγοντες που ρυθμίζουν την αιμοδυναμική του οστού είναι:

1. Η μυϊκή αντλία. Η μυϊκή δραστηριότητα προάγει τη φλεβική επαναφορά και επηρεάζει την αγωγή του περιοστέου.
2. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της μυελικής κοιλότητας (45-60 mmHg) και των εξω-οστικών κολποειδών (12-15 mmHg) ευοδώνει τη φυγόκεντρο φορά της αιματικής ροής.
3. Η πίεση σφυγμού, ύψους 8-10 mmHg, ευοδώνει επίσης τη φυγόκεντρο ροή με κάθε κύμα σφυγμού.
4. Οι δυνάμεις που ασκούν οι μύες και η φόρτιση στον σκελετό.
5. Η ροή του αίματος.

Η αιματική ροή των οστών υπόκειται και σε ορμονικό έλεγχο. Η παραθορμόνη και η βραδυκινίνη προκαλούν αγγειοδιαστολή, ενώ τα οιστρογόνα, η καλσιτονίνη και η νοραδρεναλίνη αγγειοσυσπασση. Οι ορμόνες έχουν ως στόχο τα λεία μυϊκά κύτταρα των αγγείων. Σε τοπικό επίπεδο το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα ελέγχουν επίσης την τοπική αγγειακή ροή.



Εικ. 2.9: Στη νόσο Paget η πρόληψη του τεχνητίου είναι αυξημένη λόγω τοπικής αύξησης του οστικού μεταβολισμού.



Εικ. 2.10: Άσηπτη νέκρωση του μηννοειδούς οστού (νόσος Kienböck).

2.3 Ισχαιμική νέκρωση του οστού

Η πλήρης και μόνιμη διακοπή της οστικής αιμάτωσης έχει ως αποτέλεσμα τη νέκρωση των κυττάρων, τη διακοπή της οστικής εναλλαγής, την κατάρρευση του οστού και τέλος, την απώλεια του σχήματος και τη διακοπή της λειτουργικότητάς του.

Η οστεονέκρωση έχει πολυπαραγοντική αιτιολογία με κοινό όμως παρανομαστή τη διακοπή της αγγείωσης των οστών από ενδοαγγειακά ή εξωαγγειακά αίτια. Μετά από ένα υποκεφαλικό κάταγμα του μηριαίου η αγγείωση της μηριαίας κεφαλής διακόπτεται, με αποτέλεσμα την άσηπτη νέκρωση. Στη δρεπανοκυτταρική αναιμία τα οστικά αρτηρίδια αποφράσσονται από δρεπανοκύτταρα, ενώ στη νόσο Caisson από φυσαλίδες αζώτου. Σε αποθησαυρισμικές νόσους, όπως είναι η νόσος Gaucher, το αίτιο της διακοπής της αγγείωσης είναι η εξωτερική πίεση των αγγείων στη μυελική κοιλότητα. Σε υπερλιπιδαιμία τα φλεβικά κολποειδή διογκώνονται από την άθροιση λιποσφαιριδίων τα οποία δρουν ως έμβολα. Η χρήση κορτικοστεροειδών αυξάνει την απόπτωση, δηλαδή τον προγραμματισμένο θάνατο, των οστικών κυττάρων, ενώ ο αλκοολισμός προκαλεί λιπώδη διήθηση του μυελού.

Όταν η άρδευση του οστού εξαρτάται από ένα

ή δύο αγγεία ή το ενδοστικό δίκτυο είναι τελικό χωρίς άλλες αναστομώσεις ή όταν η δυνατότητα επαναγγείωσης είναι περιορισμένη, η διακοπή της ροής του αντίστοιχου αρτηριακού στελέχους οδηγεί σε νέκρωση του οστού. Στη διάφυση των μακρών οστών η δυνατότητα επαναγγείωσης και η υποκατάσταση της αγγείωσης από παράπλευρα δίκτυα είναι μεγαλύτερη και γι' αυτό η ισχαιμική νέκρωση δεν είναι συχνή. Σε πλατέα ή μικρά οστά ή στις επιφύσεις των μακρών οστών στα οποία το αγγειακό δίκτυο είναι τελικό, η διακοπή της ροής του κύριου αγγειακού στελέχους οδηγεί αναπόφευκτα σε οστεονέκρωση. Παραδείγματα οστών στα οποία παρατηρείται ισχαιμική, άσηπτη νέκρωση αποτελούν το σκαφοειδές, το μηννοειδές, ο αστράγαλος, η επίφυση του μηριαίου και του βραχιονίου κ.λπ. (Εικ. 2.10).

Η απολίνωση της τροφοφόρου αρτηρίας σε νεαρά πειραματόζωα οδηγεί σε περισσότερο εκτεταμένη βλάβη από ό,τι σε μεγαλύτερα εξαιτίας του πτωχότερου αναστομωτικού δικτύου και της παρεμβολής στη διαδικασία της ενδοχόνδριας οστεοποίησης. Απολίνωση της τροφοφόρου αρτηρίας του μηριαίου σε νεογέννητους κονίκλους έχει ως αποτέλεσμα τη βράχυνση του μηριαίου κατά 3% μετά από 5 μήνες. Οι μεταφυσιακές αρτηρίες υποκαθιστούν την έλλειψη των τροφοφόρων αρτηριών με πολύ καλό αποτέλεσμα. Αντίστοιχα, η διακοπή της τροφοφόρου αρτηρίας στα παιδιά μπορεί να προκαλέσει νέκρωση του μυελού και τουλάχιστον των 2/3 του φλοιού.

Η παρουσία φλεβικής στάσης και ενδοστικής υπέρτασης έχει διαπιστωθεί με οστική μυελογραφία σε καταστάσεις όπως είναι η οστεοαρθρίτιδα και η οστεονέκρωση της μηριαίας κεφαλής και των μηριαίων κονδύλων και αρχικά θεωρήθηκε ως η αιτία της νέκρωσης. Όμως, σχεδόν σε όλες τις πειραματικές μελέτες η παρουσία φλεβικής στάσης στα μακρά οστά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιοστικής οστικής παραγωγής λόγω αύξησης της ροής του διάμεσου υγρού, δράση οφειλόμενη πιθανά στην έκκριση NO και προσταγλανδίνης PGE₂. Η αποσυμπίεση του οστού με την πραγματοποίηση τρυπανισμών προκαλεί σημαντική μείωση του νυκτερινού άλγους που συνοδεύει αυτές τις παθήσεις.

2.4 Επαναγγείωση των οστών μετά από οστικό τραυματισμό και κατάγματα

Το οστόν παρουσιάζει σημαντική ικανότητα αποκατάστασης των βλαβών που προκύπτουν από την επαναλαμβανόμενη φόρτιση και καταπόνησή του. Οι βλάβες στο οστόν είναι αποτέλεσμα μακροτραυματισμών ή επανειλημμένων αθροιστικών μικροτραυματισμών. Η διαδικασία αποκατάστασης μετά από μία βλάβη συνίσταται σε διαδοχικές φάσεις που αλ-

ληλοεπικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό. Η περιγραφή διαφόρων διακριτών σταδίων αποκατάστασης είναι μάλλον αυθαίρετη και εξυπηρετεί μόνο διδακτικούς και περιγραφικούς σκοπούς, αφού είναι δυνατή η ταυτόχρονη ανεύρεση εντός του ίδιου οστού και σε αρμονική γειτονία όλων των σταδίων αποκατάστασης.

Η πώρωση ενός κατάγματος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία ταχεία διαδικασία ανακατασκευής που συμβαίνει σε τρεις επιφάνειες, την ενδοστική, την περιοστική και την ενδιάμεση, φλοιώδη, στην οποία πραγματοποιείται αβέρσεια ανακατασκευής. Η παρουσία αιματικής ροής είναι αναγκαία προϋπόθεση για την εξέλιξη της πώρωσης και σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή οστού και την επιμετάλλωση των καταγμάτων. Παρεμπόδιση της φυσιολογικής αγγείωσης ενός κατάγματος οδηγεί σε πλημμελή ανάπτυξη του οστικού πώρου ή σε ψευδάρθρωση. Μετά από ένα κάταγμα μειώνονται η ενδοστική, η φλοιώδης και η περιοστική αγγείωση, ενώ κάθε είδους χειρουργική παρέμβαση μειώνει ακόμα περισσότερο την αγγείωση. Η μείωση της αγγείωσης του οστού μετά από ένα κάταγμα έχει ως αποτέλεσμα την κινητοποίηση ομοιοστατικών μηχανισμών που έχουν στόχο την επαναγγείωση των απαγγειωμένων οστικών τμη-

μάτων. Μετά από έναν οστικό τραυματισμό η τοπική ροή του αίματος μειώνεται εξαιτίας του τραυματισμού των αγγείων του και αυξάνει προοδευτικά τις επόμενες ώρες και ημέρες, φθάνοντας στη μέγιστη τιμή της μετά από 2 εβδομάδες, για να επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα μετά από 3-5 μήνες, όπως διαπιστώνεται σε πειραματικά πρότυπα. Μετά από ένα κάταγμα, η ροή του αίματος αναστρέφεται και γίνεται κεντρομόλος και παρατηρείται σημαντική αύξηση της αγγειογένεσης, ιδίως στον μυελικό σωλήνα και στο περίοσσο. Με τον τρόπο αυτό αντιρροπείται η αρχική μείωση της αγγείωσης των οστών. Η αδυναμία αποκατάστασης της αγγείωσης του οστού μετά το κάταγμα οδηγεί σε δημιουργία ψευδάρθρωσης.

Η επιδιόρθωση των οστικών βλαβών κάθε βαρύτητας πραγματοποιείται με την κινητοποίηση διαφόρων ρυθμιστικών και επιδιορθωτικών μηχανισμών που έχουν ως αποτέλεσμα την αποκατάσταση της συνέχειας του οστού χωρίς τη δημιουργία οστικής ουλής, δηλαδή χωρίς την παρουσία μη λειτουργικού οστίτη ιστού, ο οποίος να διατηρεί χαρακτηριστικά επιδιορθωτικού και όχι ώριμου ιστού. Η δυνατότητα αυτή είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του οστού και του ήπατος.

Επιλεγμένη Βιβλιογραφία

1. Brinker M, Lipton H, Cook S, Hyman A: Pharmacological regulation of the bone circulation. *J Bone Joint Surg* 1990; 72A:964-975.
2. Brookes M: The blood supply of bone: *Scientific aspects*. Springer 1998.
3. Burkhardt R, Kettner G, Bohm W, et al: Changes in trabecular bone, hematopoiesis and bone marrow vessels in aplastic anemia, primary osteoporosis, and old age: A comparative histomorphometric study. *Bone* 1987; 8:157-164.
4. Gross PM, Heistad DD, Marcus ML: Neurohumoral regulation of blood flow to bones and marrow. *Am J Physiol* 1979; 237:H440-H448.
5. Gross PM, Marcus ML, Heistad DD: Measurement of blood flow to bone and marrow in experimental animals by means of the microsphere technique. *J Bone Joint Surg* 1981; 63A:1028-1031.
6. Kelly PJ: Anatomy, physiology and pathology of the blood supply of bones. *J Bone Joint Surg* 1968; 50-A:766-783.
7. Kelly PJ, Montgomery RJ, Bronk JT: Reaction of the circulatory system to injury and regeneration. *Clin Orthop* 1990; 254:275-288.
8. Lahtinen T, Alhava EM, Karjalainen P, Romppanen T: The effect of age on blood flow in the proximal femur in man. *J Nucl Med* 1981; 22:966-972.
9. Laing PG: The blood supply of the femoral shaft: an anatomical study. *J Bone Joint Surg* 1953; 35B:462-466.
10. Lopez-Curto J, Bassingthwaighte JB, Kelly PJ: Anatomy of the microvasculature of the tibial diaphysis of the adult dog. *J Bone Joint Surg* 1980; 62A:1362-1369.
11. Oni OO, Stafford H, Gregg PJ: An investigation of the routes of venous escape from the diaphyseal marrow of the canine and rabbit long bones. *Int J Microcirc Clin Exp* 1988; 7(1):31-41.
12. Oni OO, Gregg PJ: The relative contribution of individual osseous circulations to diaphyseal cortical blood supply. *J Orthop Trauma* 1990; 4(4):441-448.
13. Rhinelander FW: Some aspects of the microcirculation of healing bone. *Clin Orthop* 1965; 40:12.
14. Rhinelander FW: The normal microcirculation of diaphyseal cortex and its response to fracture. *J Bone Joint Surg* 1968; 50A:784-800.
15. Rhinelander FW: Tibial blood supply of the human tibia. *Clin Orthop* 1974; 105:34-81.
16. Shim SS: Physiology of blood circulation of bone. *J Bone Joint Surg* 1968; 50A:812-824.
17. Tothill P: Bone blood flow measurement. *J Biomed Eng* 1984; 6:251-256.
18. Tria A, Fery A: Cortical circulation of long bones. *J Bone Joint Surg* 1979; 61A:1052-1059.
19. Whiteside LA, Lesker PA, Simmons DJ: Measurement of regional bone and bone marrow blood flow in the rabbit using the hydrogen washout technique. *Clin Orthop* 1977; 122:340-346.
20. Whiteside LA, Simmons DJ, Lesker PA: Comparison of regional bone blood flow in areas with differing osteoblastic activity in the rabbit tibia. *Clin Orthop* 1977; 124:267-270.
21. Willans SM, McCarthy ID: Heterogeneity of blood flow in tibial cortical bone: an experimental investigation using microspheres. *J Orthop Res* 1991; 9(2):168-173.