

# **Az internet ökoszisztémája és evolúciója**

# Tartalom

- Az útvonalválasztás alapjai
  - elosztott/központi, statikus/dinamikus, link-state/path-vector
  - tartományon belüli/tartományok közötti útválasztás, együttműködés
- Az üzleti modell leképezése AS-útvonalakra
  - valley-free routing: engedélyezett/tiltott utak, a valley-free utak kiszámítása
  - prefer-customer, legrövidebb AS-út, policy routing

# **Az útvonalválasztás alapjai**

# Routing versus forwarding

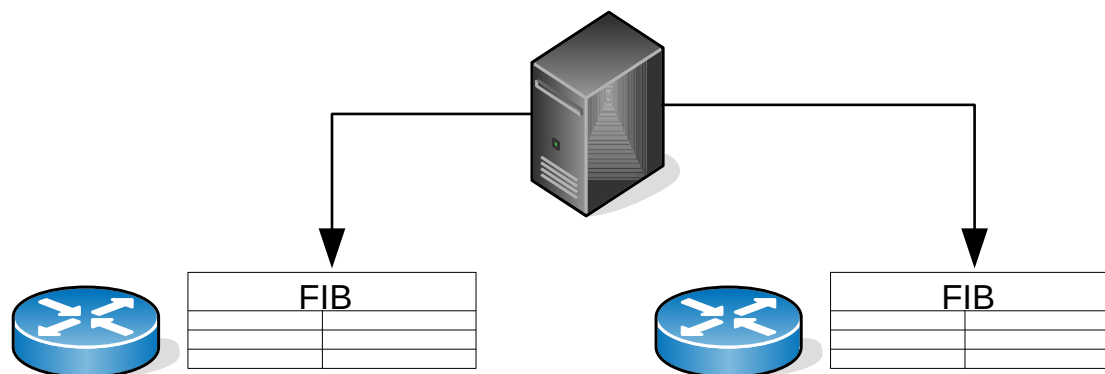
- A routing és a forwarding fogalma gyakran összekeveredik
- **Csomagtovábbítás (forwarding):** egyenként, célcím alapján, a FIB (Forwarding Information Base) szerinti következő IP címre (hop-by-hop)
- Csomagtovábbítás csak helyesen beállított és karbantartott FIB alapján történhet
- **Útvonalválasztás (routing):** topológia-terjesztés, FIB kitöltése/fenntartása/frissítése
- Dedikált routing protokollok végzik

# Statikus versus dinamikus

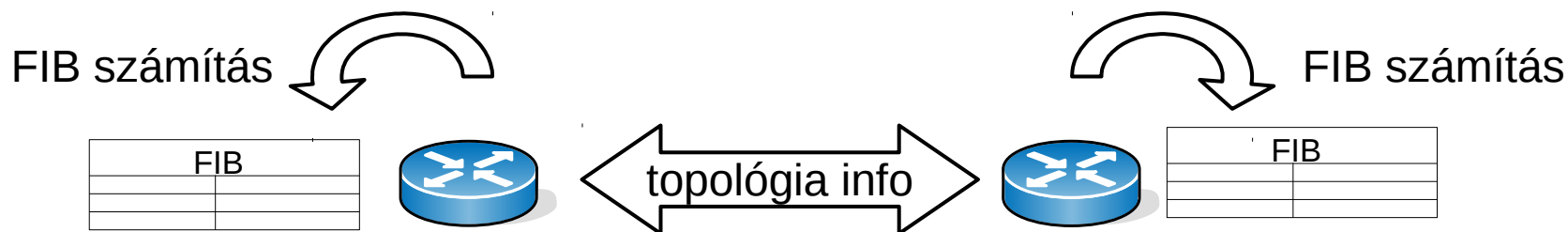
- **Statikus útválasztás:** operátor manuálisan konfigurál (például CLI-n) – **ritkán használt**
  - egyszerű, tetszőleges beállítás eszközölhető
  - de nem skálázódik és nem adaptálódik a topológiaváltozásokhoz (hiba esetén)
- **Dinamikus útválasztás:** dedikált routing protokoll állítja a FIBeket – **elterjedten használt**
  - adaptív és skálázható
  - de az utakat megszabja a protokoll (pl. csak per-destination legrövidebb út)

# Dinamikus: központi vs elosztott

- **Központi útválasztás:** dedikált szerver (route-server, PCE, SDN controller) állítja a FIBeket



- **Elosztott útválasztás:** a routerek topológia-leírókat cserélnek és egyenként állítanak FIBet



# Elosztott útválasztás menete

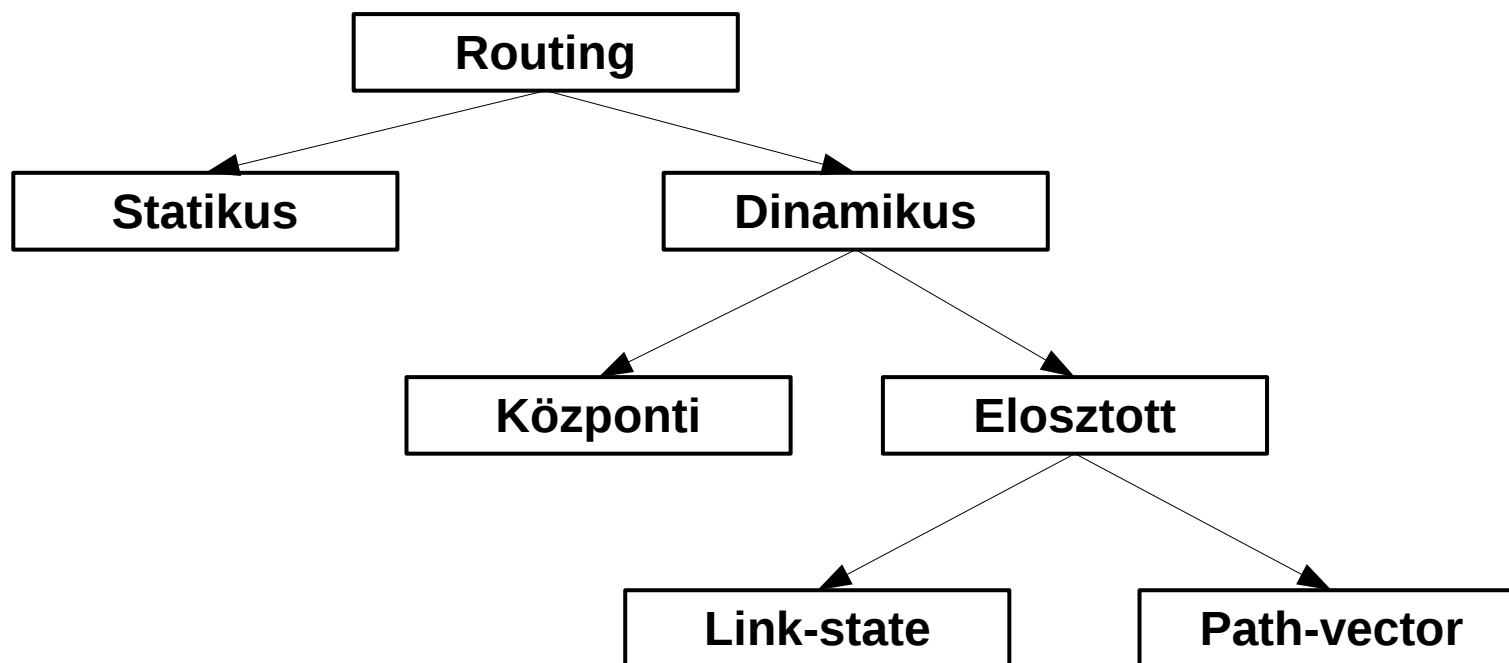
- Szomszédos routerek felfedezik egymást
- A routerek megosztják egymás közt a topológiával vagy a lehetséges útvonalakkal kapcsolatos információikat (routing state)
- A hálózatileíró információkat a szomszédos routerek folyamatosan frissítik (így egy elosztott routing state adatbázist fenntartva)
- Minden router minden általa ismert prefixre kiválasztja a legjobb útvonalat
- A legjobb útvonal next-hop-ját letölti a FIBbe

# Elosztott: link-state vs path-vector

- **Link-state:** hálózatileíró = topológia
  - minden router tudja a gráfot, rugalmas útválasztás valamilyen „távolság” szerint
  - de csak ha minden router megegyezik a policy-ben! (pl. legrövidebb út az ASen belül)
- **Path-vector:** hálózatileíró = átjárható útvonalak
  - next-hop: az ismert utak közül a „legjobb”
  - nem kell „távolság” metrika
  - routerenként egyedi policy állítható be
- **Distance-vector:** kihalóban



# Routing protokollok



# ASen belül és ASek között

- Az internet hierarchiaszintjein különböző routing protokollok futnak
- **Intra-domain routing:** ASen belüli hosztok/routerek közti utak kiépítése
  - **Interior-Gateway Protocol (IGP)**
  - tipikusan ASen belül a routing policy homogén (pl. legrövidebb út): **link-state**
- **Inter-domain routing:** ASek közti útvonalak
  - **Exterior Gateway Protocol (EGP)**
  - heterogén útválasztási szempontok: **path-vector**

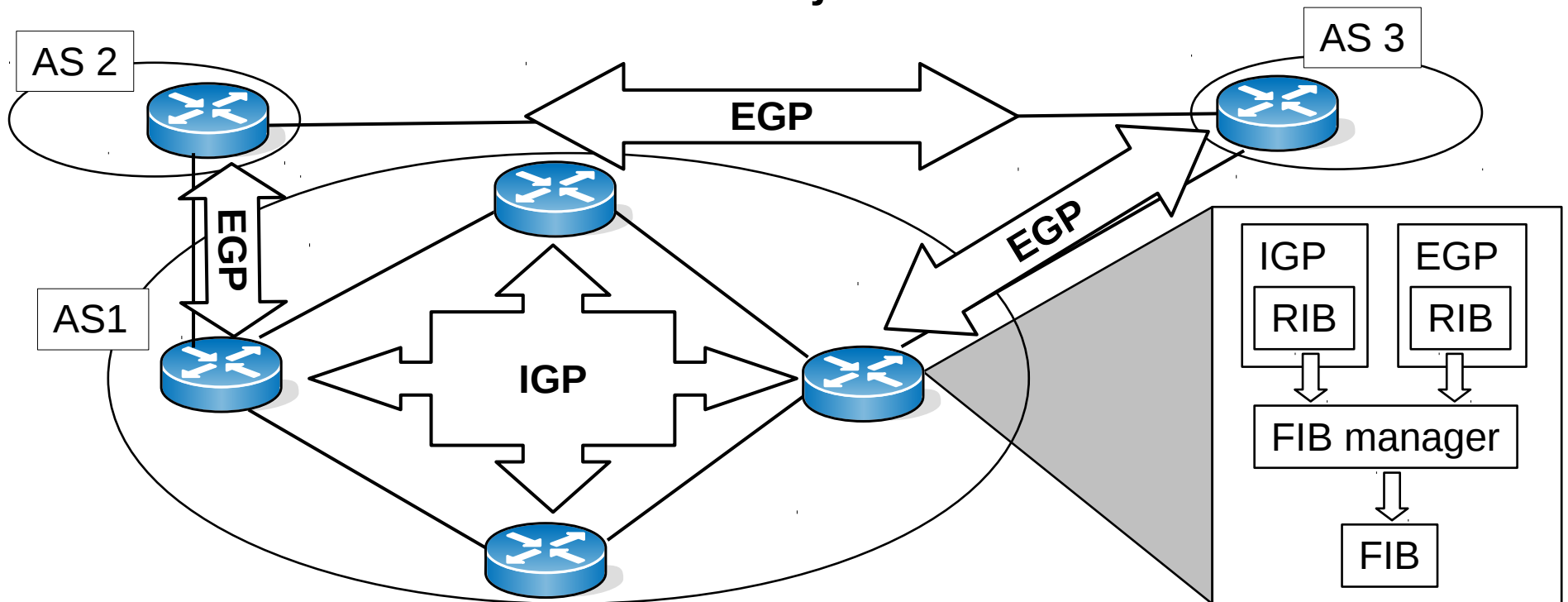
# A „Nagy négyes”

	<b>Link-state</b>	<b>Vector</b>
<b>IGP</b>	OSPF, IS-IS	RIP (kb.)
<b>EGP</b>		BGP

- OSPF: Open-Shortest Path First
- IS-IS: Intermediate-System-to-Intermediate-System
- RIP: Routing Information Protocol
- BGP: Border Gateway Protocol

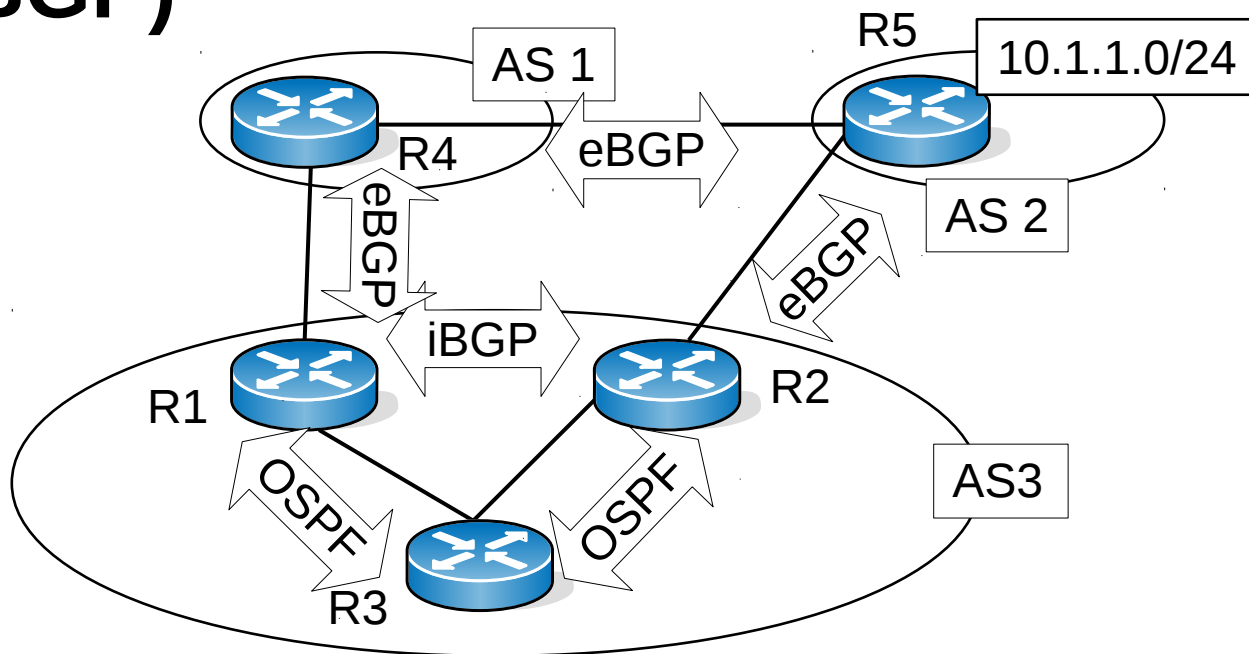
# IGP/EGP együttműködés

- Több routing protokoll fut párhuzamosan
  - legalább egy EGP és egy IGP
  - mindegyik saját RIBet épít
  - a router ebből szintetizálja a FIBet



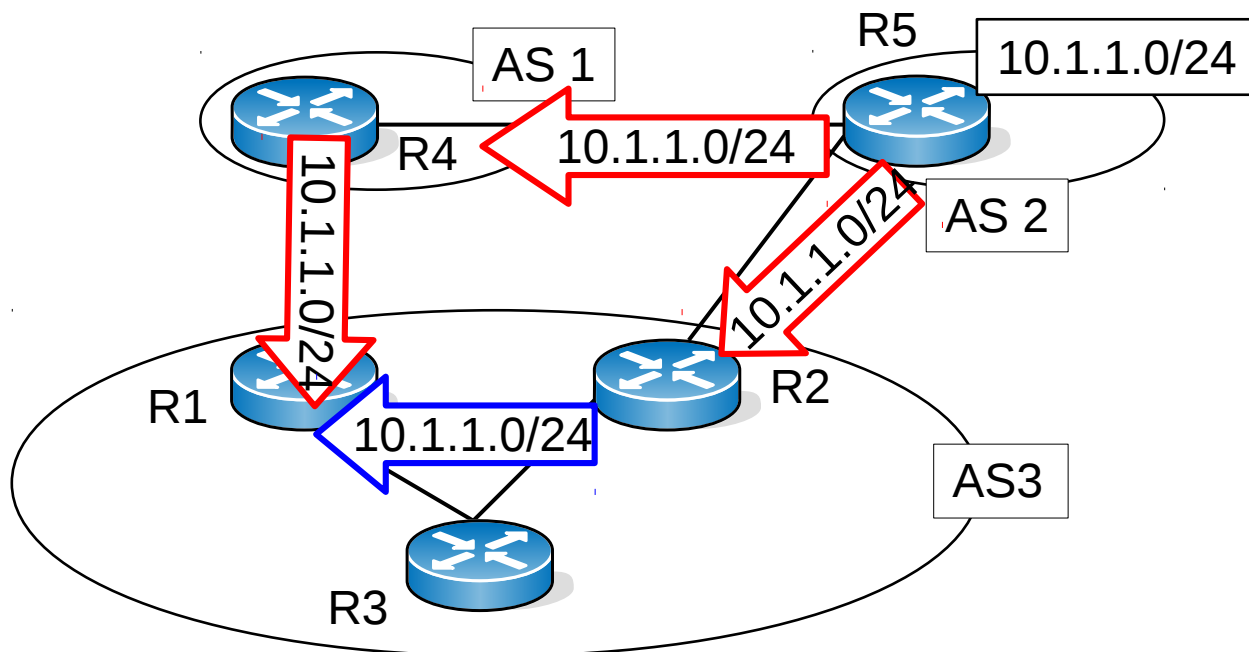
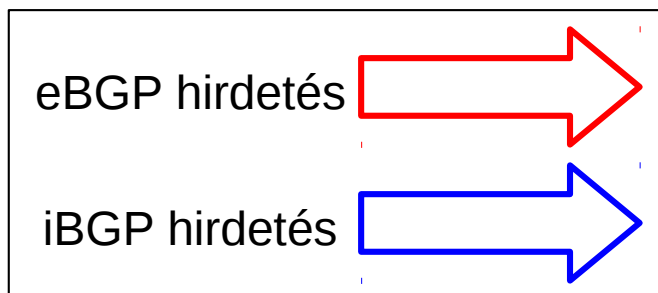
# IGP/EGP együttműködés

- Alább R1 két módon érhet el egy külső hosztot
  - AS1-en keresztül (R4 felé)
  - vagy AS2-n keresztül (R2 felé majd R5-ön át)
- A külső útvonalakat ASen belül is terjeszteni kell:  
**iBGP (Internal BGP)**
- Az ASek közt futó BGP-t ezért gyakran **eBGP**-nek (External BGP) hívják



# IGP/EGP együttműködés

- Például AS2 hirdeti a 10.1.1.0/24 prefixet
- R5 eBGP-n elküldi a hirdetést R2-nek és R4-nek, amely szintén eBGP-n elküldi R1-nek
- R2 a hirdetést iBGP-n továbbítja R1-nek (iBGP-n, hiszen ASen belüli routerek közt történik)

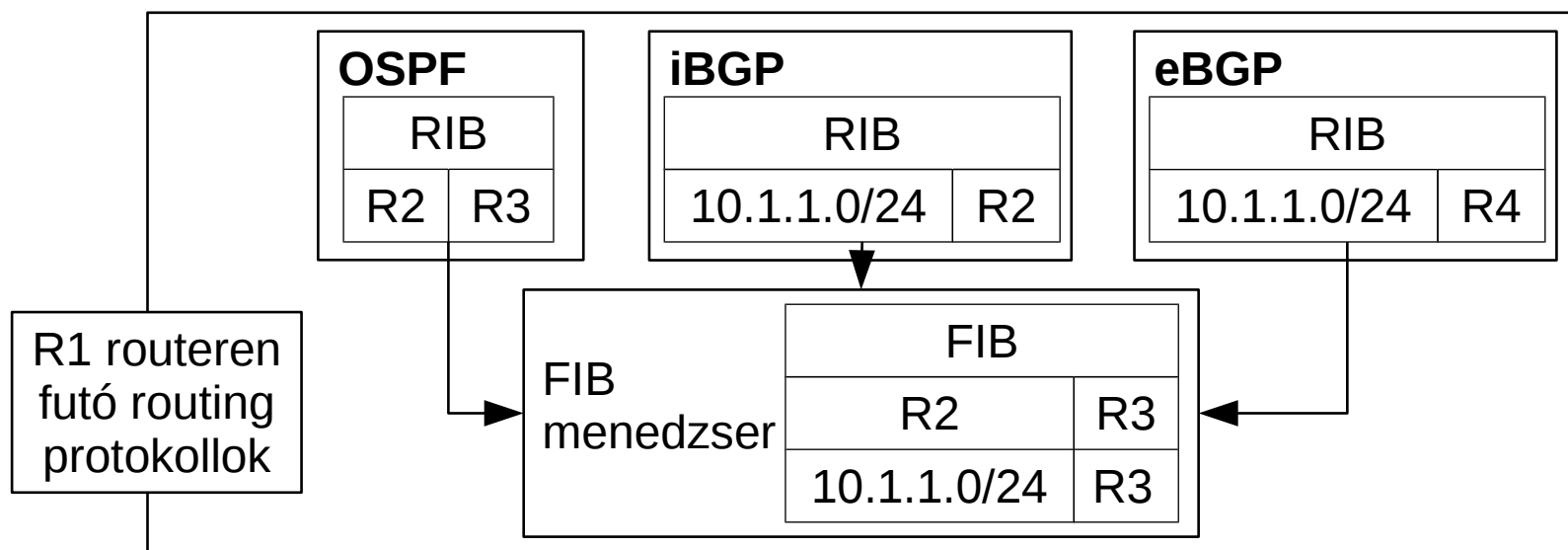
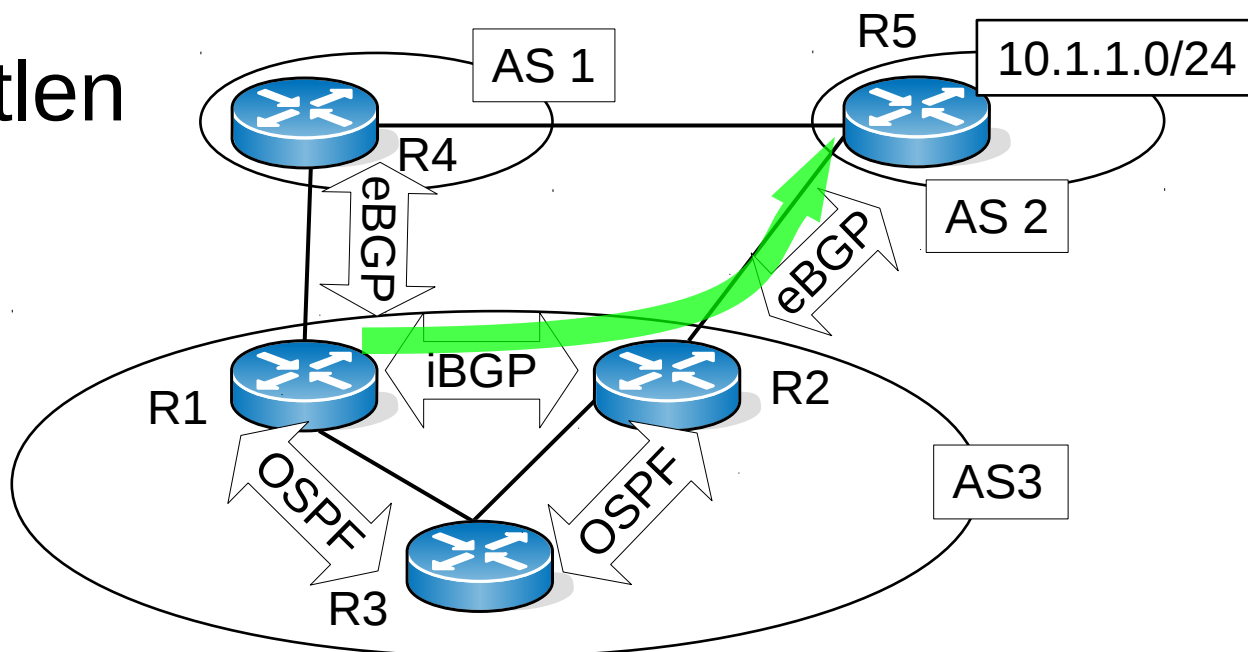


# IGP/EGP együttműködés

- R1 a `10.1.1.0/24` prefixre több hirdetést kap
  - R4-től kapott hirdetés az eBGP RIB-ben, R2-től kapott hirdetés az iBGP RIB-ben (sokszor nem különülnek el ezek, Ciscon például közös az eBGP-iBGP RIB)
  - de mivel R2 közvetlenül nem szomszéd, ezért az OSPF RIB-ben meg kell keresni `R1→R2` next-hopot
- Az operátor dönti el, melyik utat preferálja → FIB
- A „távoli” next-hopokat rekurzívan visszafejti
  - `10.1.1.0/24` prefixhez R2 a next-hop (iBGP), R2-höz pedig R3(OSPF), így `10.1.1.0/24`-höz végül az R3 next-hopot rendeljük a FIBben

# IGP/EGP együttműködés

- Ha AS3 a közvetlen AS2 felé vezető utat preferálja
- Az iBGP hirdetést fogadja el





# IGP/EGP együttműködés

- A **FIB menedzser** feladata az egyes routing protokollok RIBjeiből összeállítani a FIBet
- Az operátor súlyokat rendel a protokollokhoz
- Ha egy prefix több RIBben is megtalálható, a **kisebb súlyú** protokoll nyer

**lokális < statikus < OSPF < eBGP < iBGP**

- A lokális útvonalakat mindig azonnal elfogadjuk
- eBGP < iBGP miatt a szomszéd AS-tól kapott utat preferáljuk az AS-beli routertől kapott út előtt: **hot-potato routing** (később)

# **Az AS-szintű üzleti modell leképezése útvonalakra**

# Inter-domain routing

- **Útválasztási preferencia (routing policy):** egy ISP AS-AS szintű üzleti stratégiájának leképezése útválasztási szabályokra
- A bonyolult útválasztási preferenciák kifejezéséhez hatékony útválasztási protokoll szükséges → a BGP

*Hogyan lehet a tranzit-peer kapcsolatokat illetve a „prefer-customer” szabályt leképezni az útválasztás nyelvére?*

# AS kapcsolatok: tranzit vs peer

- Két AS tipikusan vagy tranzit vagy peer kapcsolatot hoz létre
  - **tranzit:** globális internet-hozzáférés pénzért
  - **peer:** „ingyen” adatcsere a két szolgáltató és azok összes előfizetője között
- Most csak ezekkel a tipikus esetekkel fogunk foglalkozni

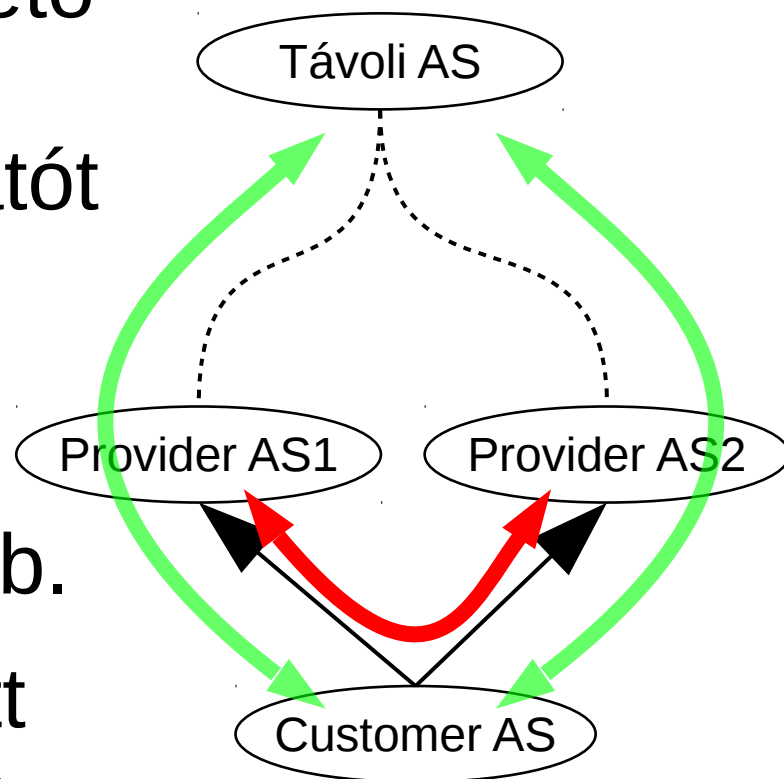
*Milyen AS-szintű útvonalakat eredményeznek a fenti üzleti megfontolások?*

# Engedélyezett és tiltott utak

- A megvalósuló utak leképezik az ISP-k gazdasági/üzleti érdekeit
- **Engedélyezett út:** útvonal egy AS-en keresztül, amely megegyezik annak gazdasági érdekeivel
  - pl. bármilyen tranzit út egy szolgáltató AS-en keresztül → profit
- **Tiltott út:** a gazdasági érdekekkel ellentétes út
  - pl. két tranzit szolgáltató közt, előfizetőn át
  - az előfizető nem szerződött ilyen forgalomra → anyagi veszteség

# Tranzit: megengedett/tiltott utak

- **Engedélyezett út:** az előfizető és bármely AS között (beleértve magát a szolgáltatót illetve annak bármely előfizetőjét is): *Customer AS ↔ Provider AS1*, *Customer AS ↔ Távoli AS*, stb.
- **Tiltott út:** szolgáltatók között az előfizető AS-en keresztül: *Provider AS1 → Customer AS → Provider AS2*

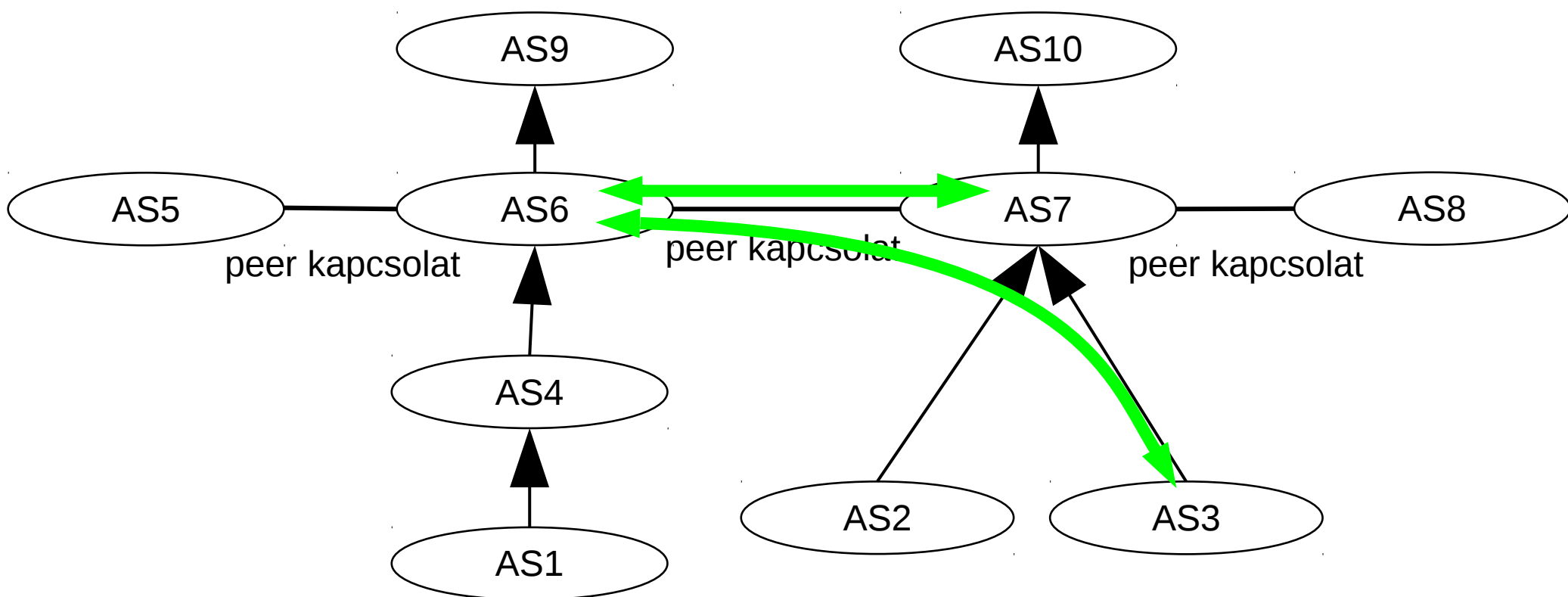


# Peer kapcsolat: engedélyezett utak

1) Két peer AS között: AS6-AS7, AS7-AS8, ...

2) Előfizető és a peer között: AS4-AS7, AS6-AS3

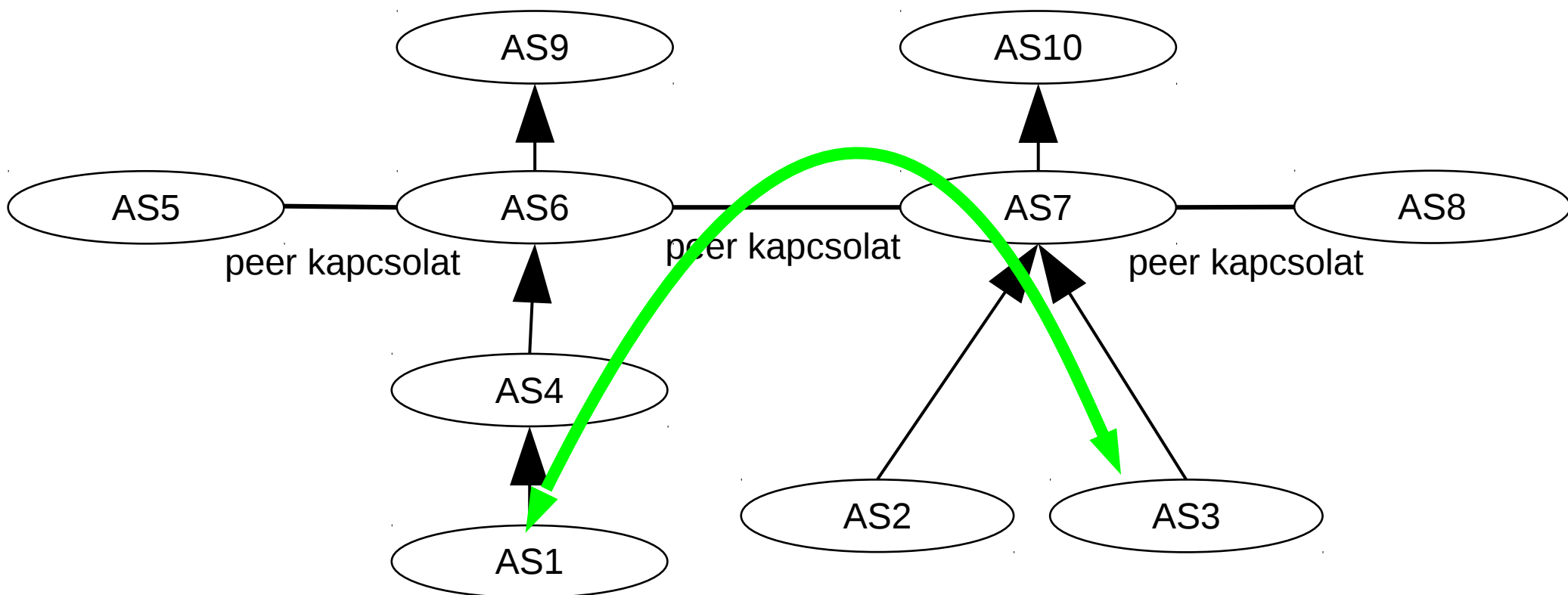
- előfizető előfizetője is OK: AS1-AS7



# Peer kapcsolat: engedélyezett utak

3) Peer AS-ek bármely két előfizetője között:  
AS4-AS3

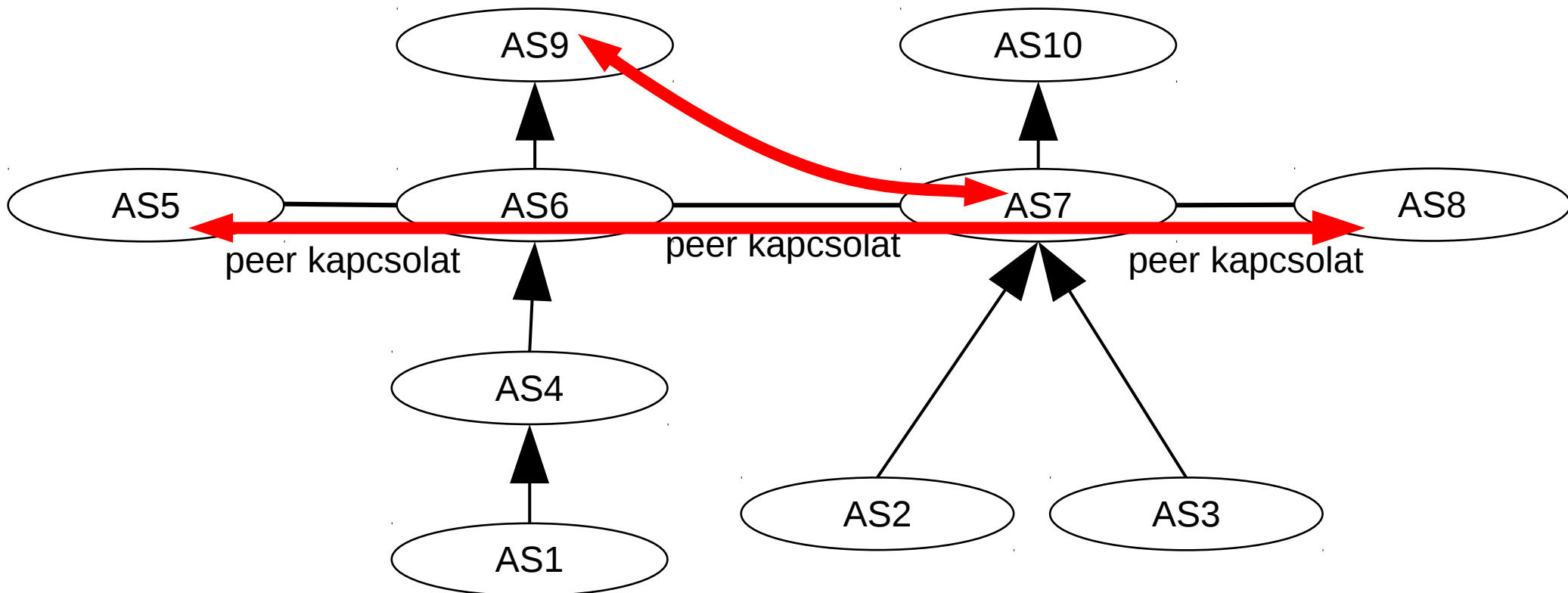
- tranzitív viszony: AS1-AS2, AS1-AS3 is OK





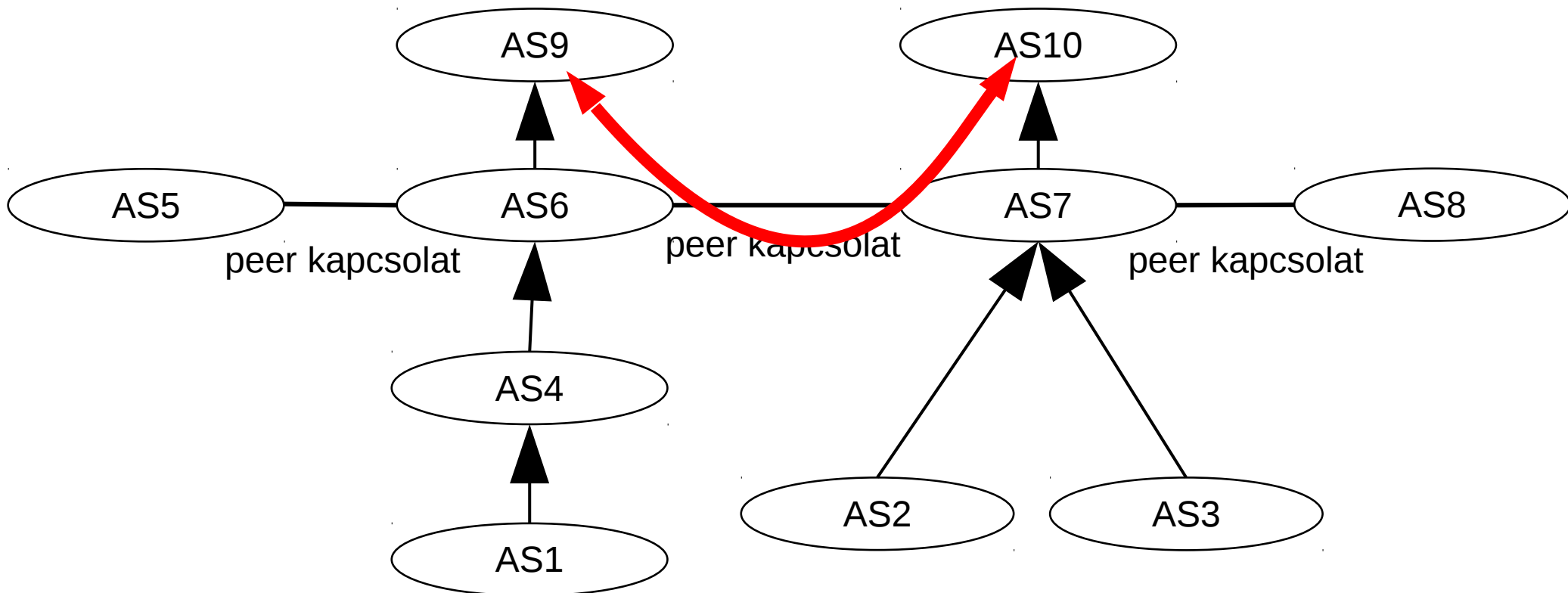
# Peer kapcsolat: tiltott utak

- 1) Nem közvetlen peer kapcsolatban levő AS-ek között: AS5-AS7, AS5-AS8
- 2) AS szolgáltatója és peer-e között: AS9-AS7



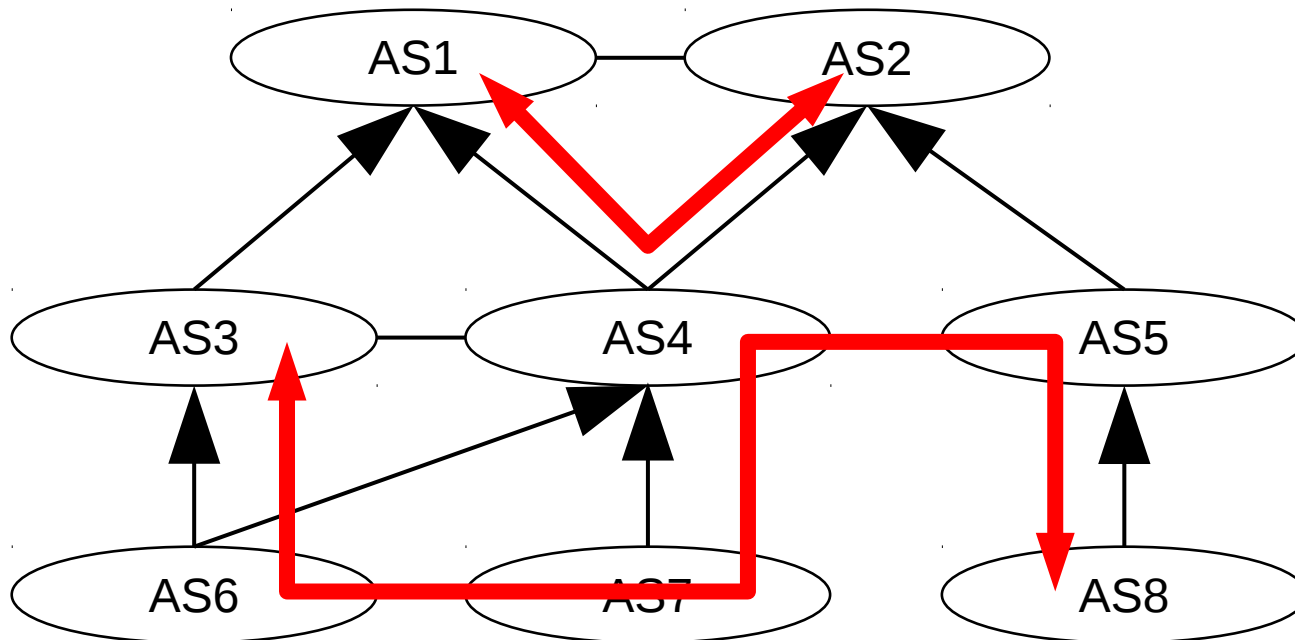
# Peer kapcsolat: tiltott utak

3) AS bármely szolgáltatója és a peer AS bármely szolgáltatója között (AS9-AS10), mert ez tranzit szolgáltatás lenne, amiért pénz járna



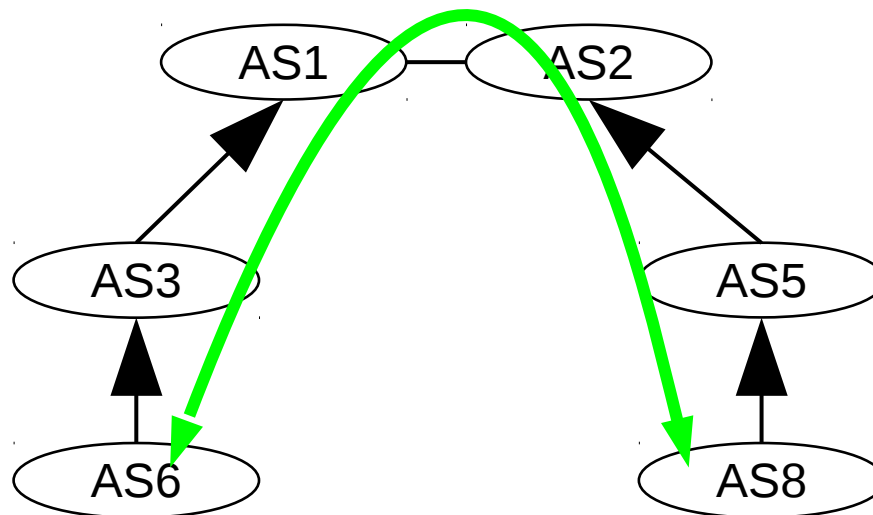
# Valley-free routing

- A fenti kritériumok szerinti útvonalválasztás együttes neve: **valley-free routing**
- Az elnevezés háttere: a valley-free routing tiltja a „völgyeket” a tranzit hierarchiában



# Valley-free routing: szabályok

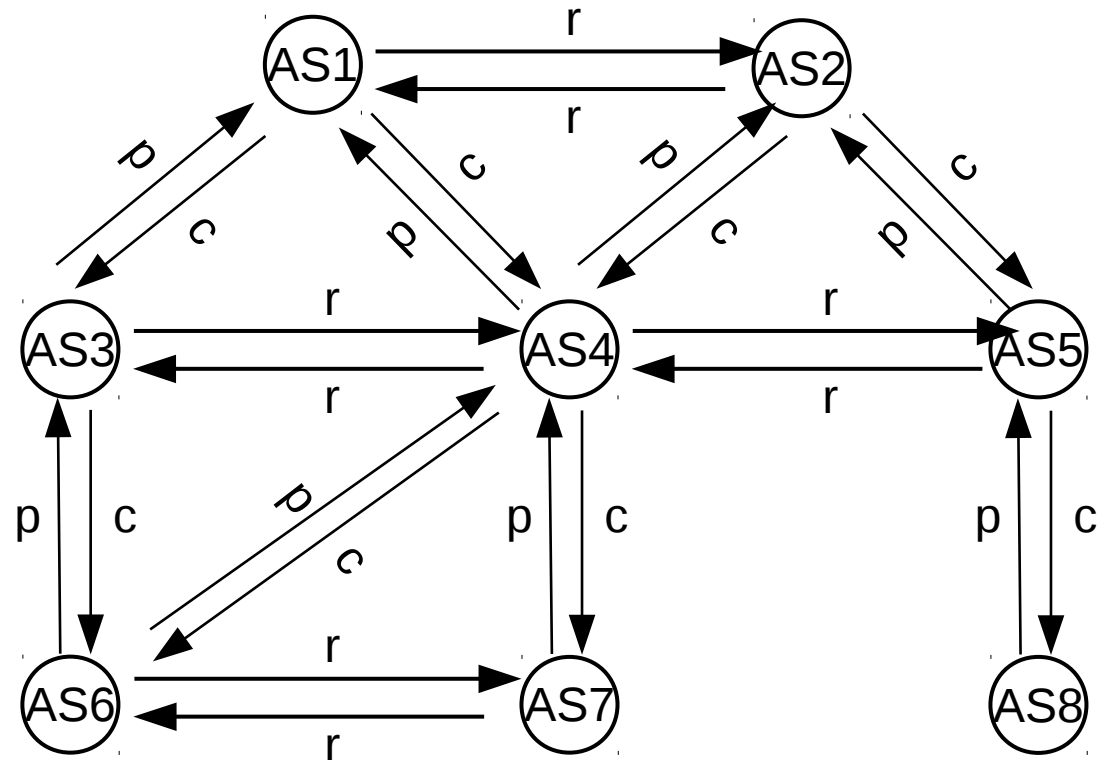
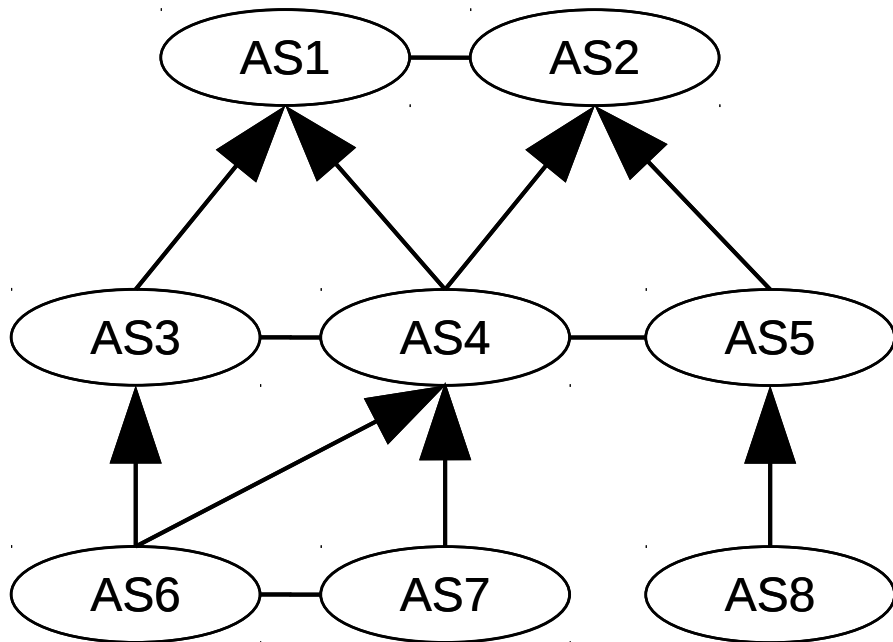
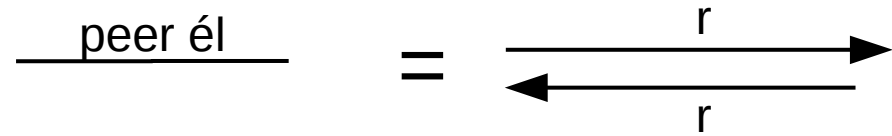
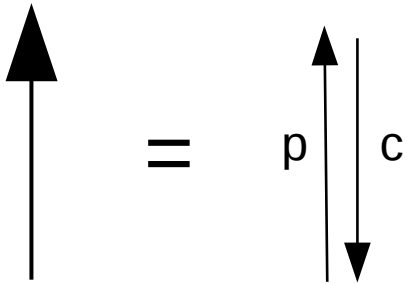
- **Def.:** egy útvonal megengedett, ha sorrendben
  - először tartalmaz nulla vagy több *előfizető* → *szolgáltató* élt
  - majd nulla vagy egy *peer* ↔ *peer* élt
  - végül bármennyi *szolgáltató* → *előfizető* élt



# Valley-free routing reprezentáció

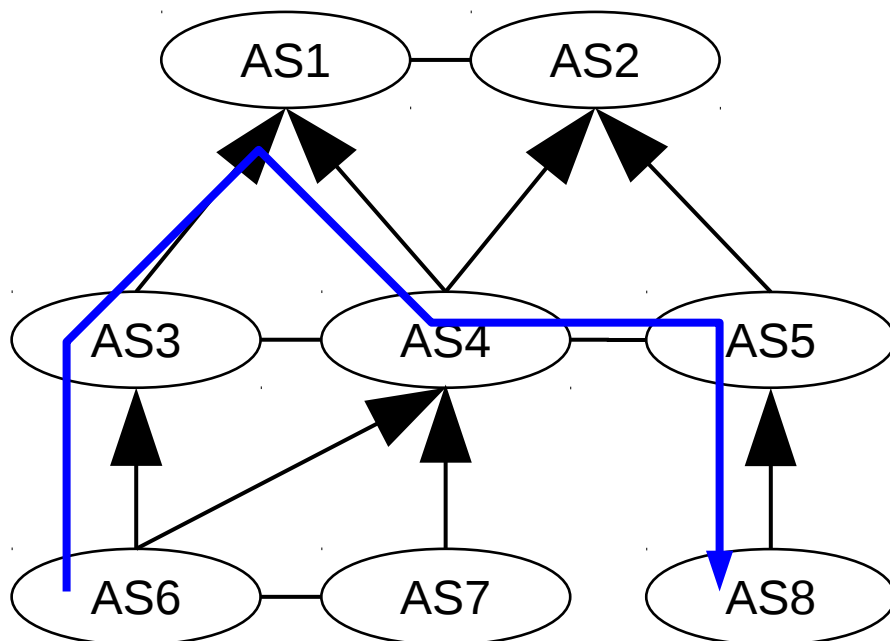
- Hogyan kell a valley-free útvonalakat számolni?
- Építsünk egyszerű címkézett AS-szintű **gráf-reprezentációt**
- A gráf pontjai az ASek, élei pedig az alábbiak
  - a tranzit él az *előfizető* → *szolgáltató* irányban: irányított él  $p$  (**provider**) címkével
  - a *szolgáltató* → *előfizető* irányban: irányított él  $c$  címkével (**customer**)
  - a *peer* él bármely irányban: irányított él  $r$  címkével (**peer**)

# Valley-free routing reprezentáció



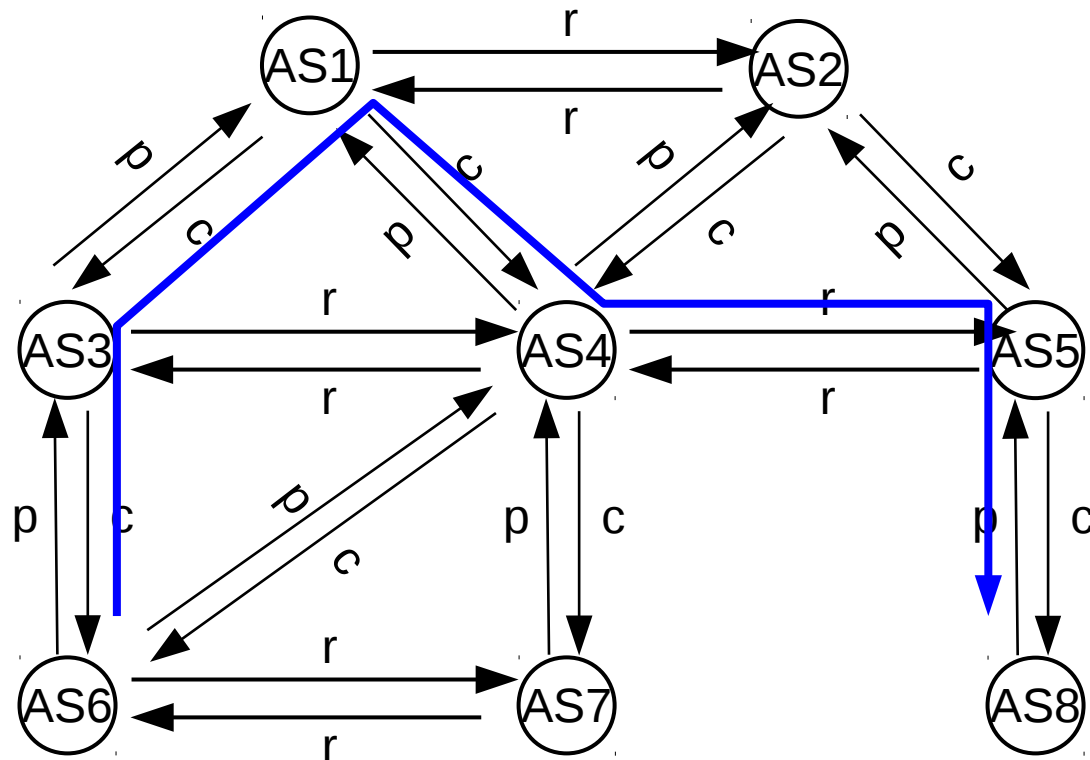
# Valley-free routing számítása

- A gráfrepresentáció egyszerűen használható annak eldöntésére, hogy egy útvonal megengedett-e a valley-free routingban
- Megengedett például az alábbi útvonal?



# Valley-free routing számítása

- Írjuk fel a gráfrepresentációt az útvonallal



- Írjuk fel az irányított útvonal éleinek címkéjét:

*p, p, c, r, c*



# Valley-free routing számítása

- Zárójelezzünk hátulról és végezzük el az alábbi műveletet

<b>+</b>	<b><i>c</i></b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>r</i></b>	<b><math>\infty</math></b>
<b><i>c</i></b>	<i>c</i>	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b><i>p</i></b>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	$\infty$
<b><i>r</i></b>	<i>r</i>	$\infty$	$\infty$	$\infty$

$$p+(p+(c+(r+c))) = p+(p+(c+r)) = p+(p+\infty) = p+\infty=\infty$$

- Tiltott ha az eredmény  $\infty$ , megengedett egyébként (így az eredmény: az út tiltott!)

# Valley-free routing számítása

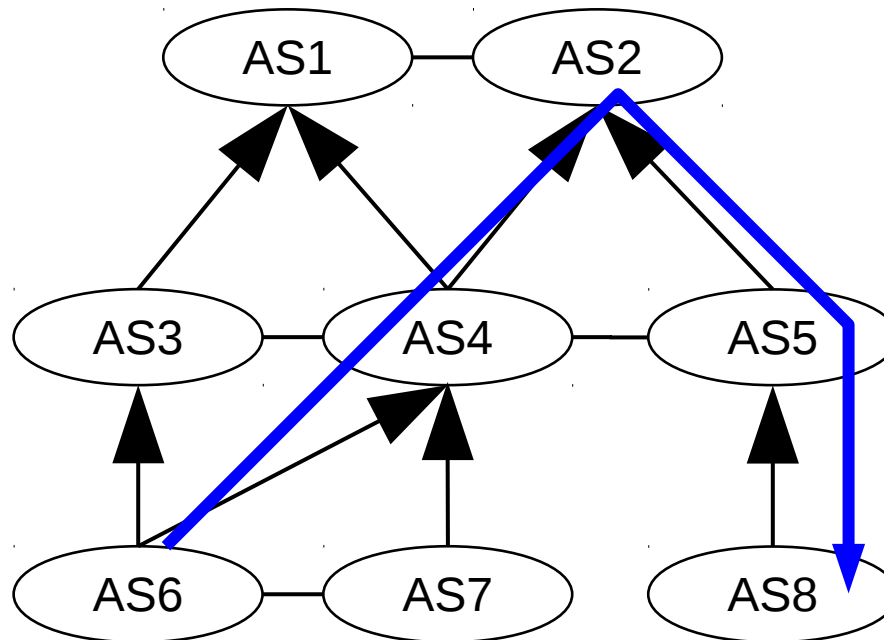
<b>+</b>	<b><i>c</i></b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>r</i></b>	<b><math>\infty</math></b>
<b><i>c</i></b>	<i>c</i>	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b><i>p</i></b>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	$\infty$
<b><i>r</i></b>	<i>r</i>	$\infty$	$\infty$	$\infty$

- Tiltott útvonal: ha *cp*, *cr*, *rp*, vagy *rr* részútvonalat tartalmaz
- **Tétel:** egy valley-free útvonal megfelel az alábbi reguláris kifejezésnek:

$$p^*r^*c^*$$

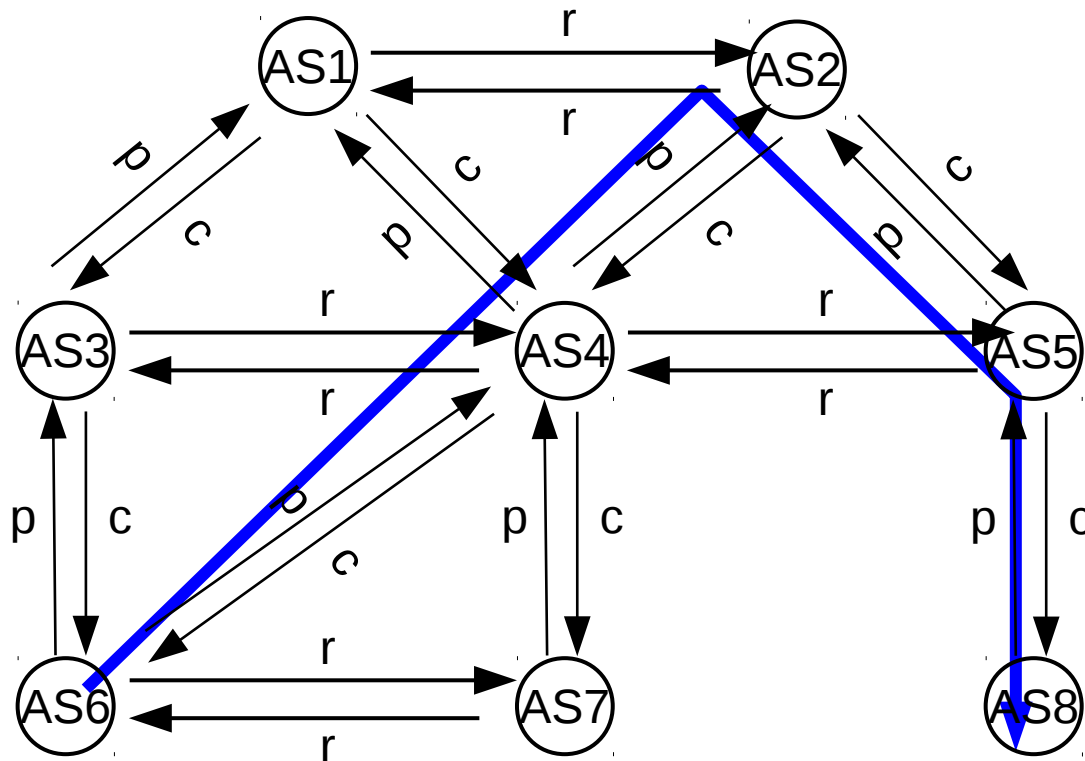
# Valley-free routing: példa

- Megengedett-e az alábbi  $AS6 \rightarrow AS8$  útvonal?



# Valley-free routing: példa

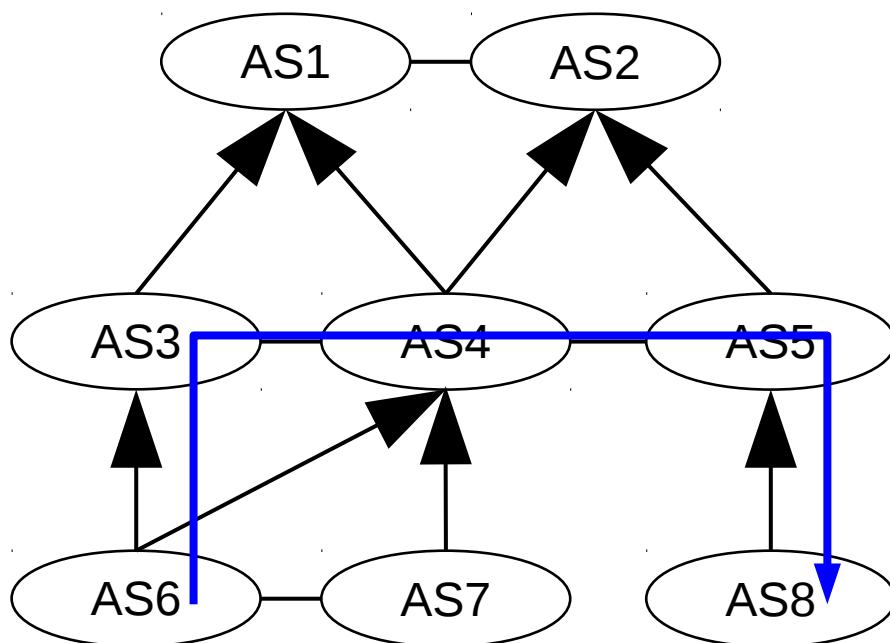
- A gráfrepresentációból kiolvasható az útvonal címkéje:  $p+(p+(c+c))=p+(p+c)=p+p=p$
- Az útvonal megengedett



# Valley-free routing: példa

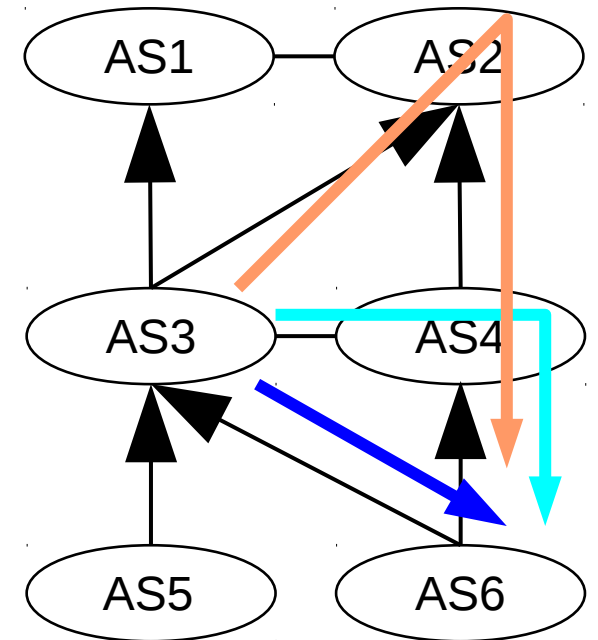
- De az alábbi  $AS6 \rightarrow AS8$  útvonal már nem megengedett

$$p+(r+(r+c))=p+(r+r)=p+\infty=\infty$$



# Útvonalak preferenciája

- A példában AS3-nak 3 valley-free útvonala van AS6 felé:
  - AS2 tranzit szolgáltatón keresztül
  - AS4 peer kapcsolaton keresztül
  - vagy a közvetlen AS6 linken keresztül
- Hogyan válasszon ezek közül?

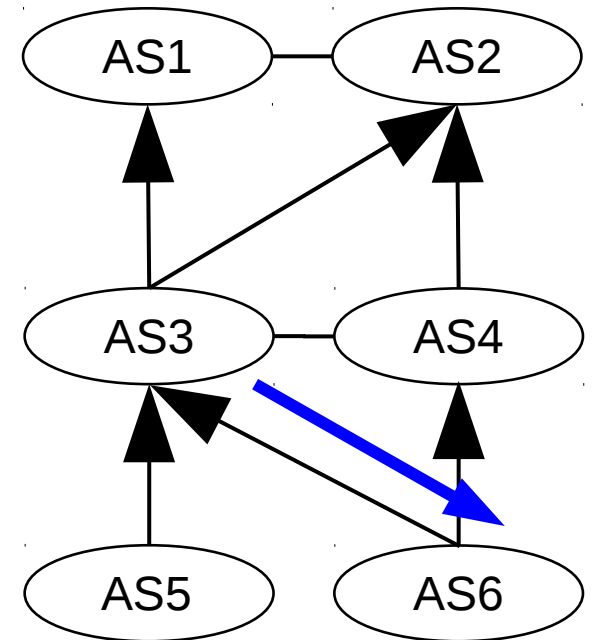


# Útvonalak preferenciája

- Ha a szolgáltató felé irányítjuk a forgalmat: tranzit díjat kell fizetni
- Ha egy peer AS felé: a forgalom valószínűleg ingyen van (kivéve paid peering esetén)
  - de ha „túlterheljük” a peer kapcsolatot
  - felborulhat a „szimmetrikus forgalmi igények” kritérium a peering policy-ben
- Ha előfizető felé: biztos, hogy ingyen lesz a forgalom

# „Prefer customer” szabály

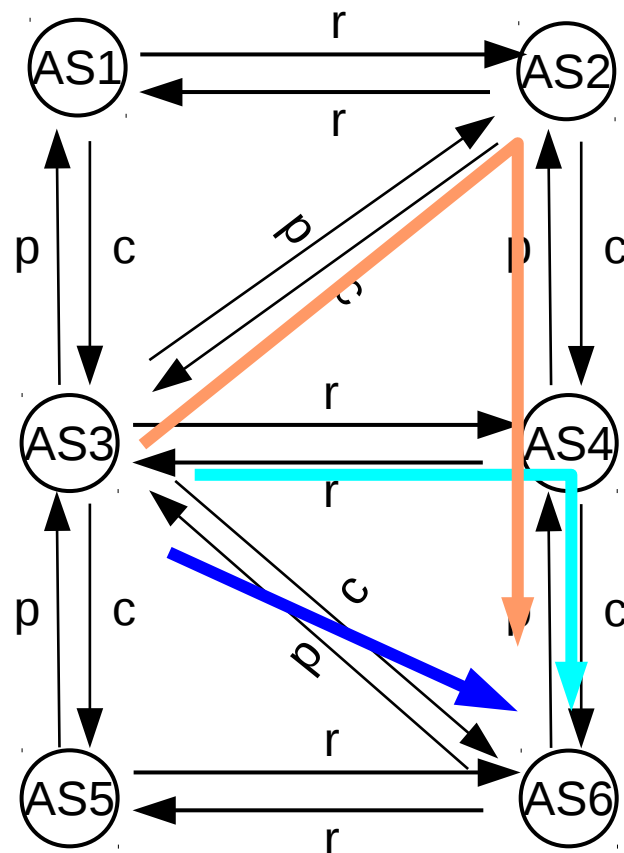
- Tipikusan az ISP-k preferálják az előfizetőn keresztüli útvonalakat
- A preferencia sorrendje:
  1. *szolgáltató* → *előfizető* élel kezdődő útvonal
  2. *peer* → *peer* élel kezdődő útvonal
  3. *előfizető* → *szolgáltató* élel kezdődő útvonal





# „Prefer customer” szabály

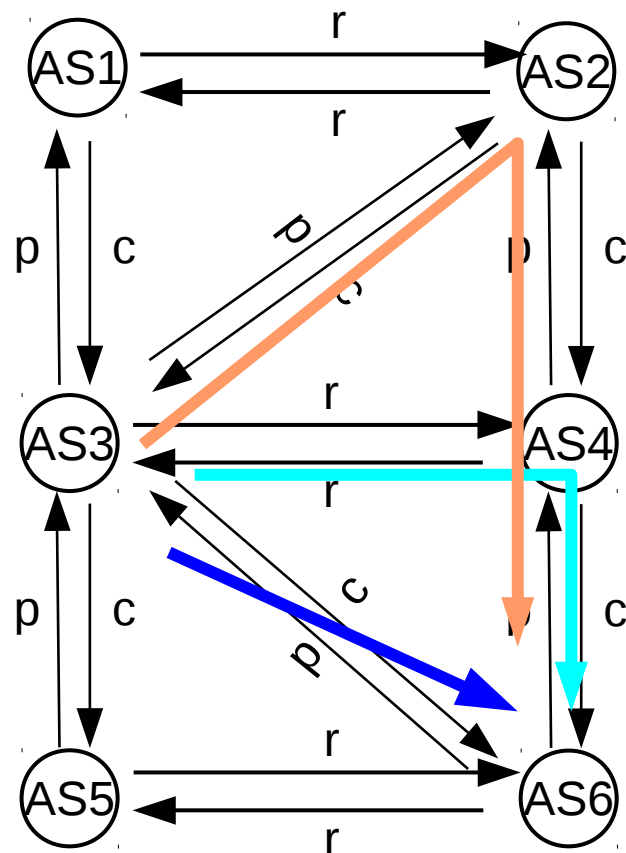
- A gráfmodellben:
  - a szolgáltatón keresztül vezető útvonal:  
$$p+(c+c) = p+c=p$$
  - a peer útvonal  
$$r+c=r$$
  - a közvetlen út:  $c$
- **Észrevétel:** a kalkulus pont az út első élének címkéjét adja végeredményül



# „Prefer customer” szabály

- Legyen  $l(P)$  egy  $P$  útvonal címkéje, amelyet úgy kapunk, hogy kiértékeljük a + műveletet az út éleinek címkéjén
  - $P_p$  (provider út):  $l(P_p) = p$
  - $P_c$  (customer út):  $l(P_c) = c$
  - $P_r$  (peer út):  $l(P_r) = r$
- **Tétel:** a „prefer customer” leírható az alábbi relációval:

$$P_c < P_r < P_p$$



# „Prefer customer” szabály

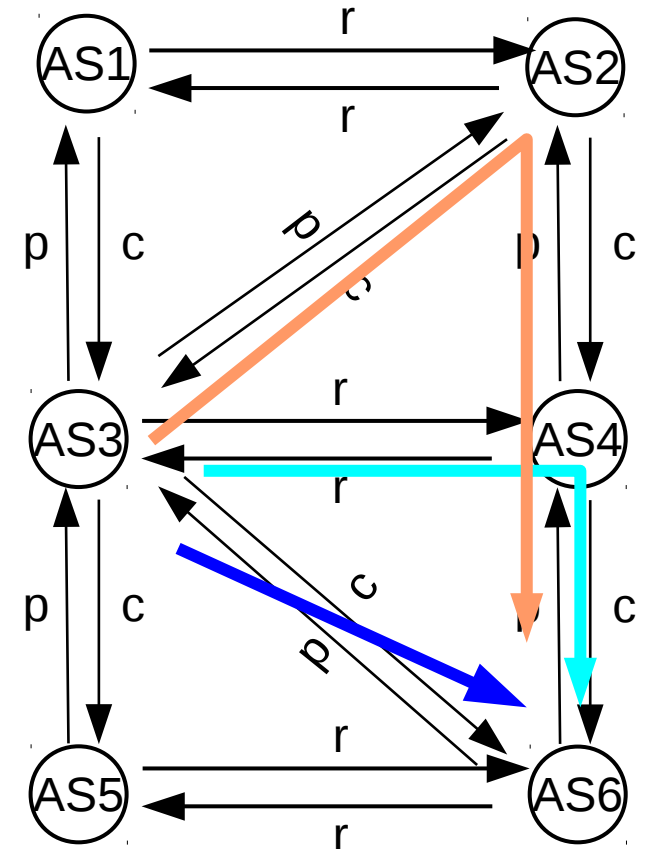
- A példánkban:

$c <$  (előfizető út)

$r+c=r <$  (peer út)

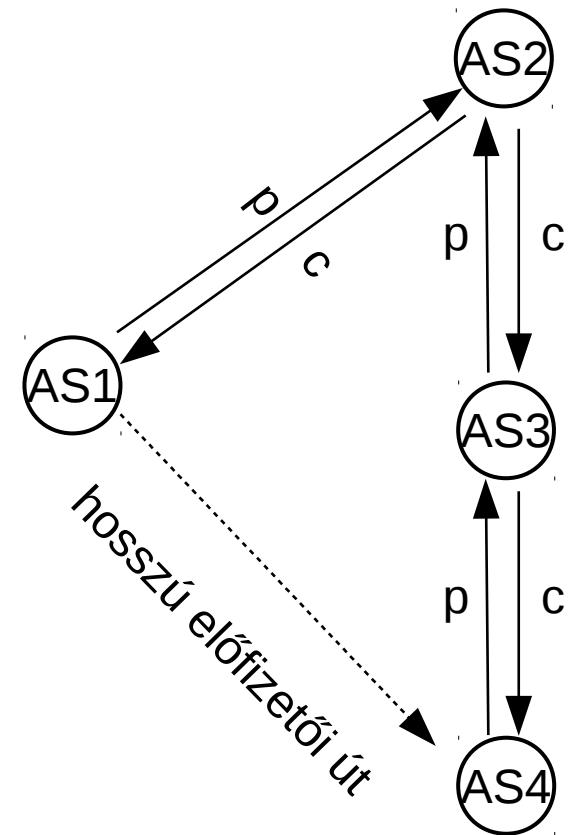
$p+(c+c)=p+c=p$  (tranzit út)

- A relációs jel a kevésbé preferált útvonal felé mutat



# „Prefer customer” szabály

- A „prefer customer” szabály nem mindig eredményez „jó” utat
- Ha AS1 és AS4 között előfizetői linkek hosszú sorozata
- Ésszerűbb lehet a rövidebb tranzitot választani AS2-n át
- Az operátor autonóm döntése
- Az ISP policy-k nagyon összetettek lehetnek!



# Legrövidebb AS-útvonal

- Ha több, azonos preferenciájú útvonal is elérhető
  - például itt AS1 választhat egy 2 AS-ből álló és egy „nagyon hosszú” előfizetői út közül
- Célszerű az azonos preferenciájú utak közül a rövidebbet választani:  
**legrövidebb AS útvonal**
- De először a preferencia számít!

