

جلسه هشتم

نظریه اطلاعات شبکه: مقدمه

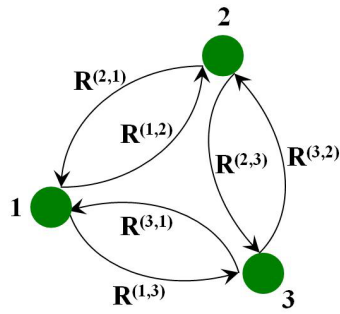
آنچه تاکنون بررسی شد ارتباط نقطه به نقطه از منظر نظریه اطلاعات بود. در ادامه به بررسی شبکه‌ها از منظر نظریه اطلاعات می‌پردازیم. در یک شبکه چندین گره وجود دارد که از طریق یک محیط مشترک مخابراتی (مثلاً از طریق ارتباط بی سیم) با همدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. هر کدام از گره‌ها می‌توانند دسترسی به منابع اطلاعاتی خاصی داشته باشند. هدف گره‌ها در شبکه می‌تواند بسیار متنوع باشد. مثلاً هدف می‌تواند انتقال این اطلاعات به گره‌های دیگر باشد که در این صورت از این اطلاعات شخصی با نام "پیام" اسم می‌بریم. اما هدف هر گره ممکن است محاسبه یک تابع از اطلاعات گره‌های دیگر، و یا انجام یک تصمیم‌گیری باشد. این تصمیم‌گیری می‌تواند با اهداف مختلفی انجام پذیرد. مثلاً فرض کنید که گره‌های یک شبکه با استفاده از حسگرهایشان حالت یک سیستم را اندازه بگیرند و اطلاعات اندازه‌گیری شده را به یکدیگر جهت کنترل حالت سیستم منتقل کنند. ممکن است که گره‌های شبکه بازگرهای یک بازی باشند که برای هماهنگی با همدیگر ارتباط برقرار میکنند.

از آنجایی که گره‌های شبکه از طریق یک محیط مشترک مخابراتی با همدیگر ارتباط برقرار می‌کنند، تنش و رقابت‌های پیچیده‌ای میان آنها برای استفاده از این محیط مشترک می‌تواند بوجود بیاید. در کنار این تنش همکاری گره‌ها برای رسیدن به یک هدف مشترک نیز می‌تواند بر پیچیدگی مساله بیفزاید. علاوه بر این بدلیل بازخوردهایی که در سیستم می‌تواند وجود داشته باشد، اطلاعات گره‌ها با گذشت زمان می‌تواند زیاد شود و این افزایش اطلاعات چالش‌های جدیدی را به مساله اضافه کند. همچنین در بسیاری از موارد ملاحظات امنیتی نیز وارد مساله میشود. مثلاً برخی از گره‌ها نباید به اطلاعات برخی از دیگر گره‌های شبکه دست بیابند. همچنین نحوه دستیابی گره‌ها به منابع اطلاعاتی شان می‌تواند پیچیده باشد؛ مثلاً برای مدت طولانی به آنها اطلاعاتی نرسد و به یکباره با حجم زیادی از داده روبرو شوند. ساختار شبکه، تعداد گره‌ها و نحوه اتصالات آنها به هم نیز ممکن است دارای تحول زمانی باشد.

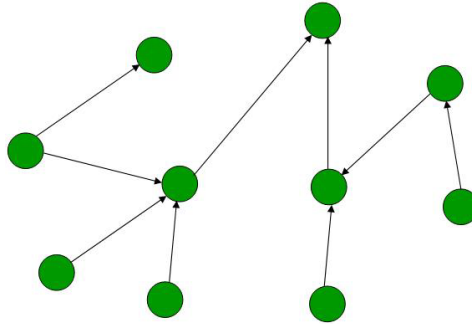
۱ سه مشخصه هر مساله مخابراتی

برای مشخص کردن هر مساله مخابراتی باید سه چیز را مشخص کرد: امکاناتی که در دسترس گره‌ها میباشد چیست و محدودیت‌های استفاده از این امکانات کدام است؟ منابع اطلاعاتی مشاهده شده توسط گره‌ها چیست؟ هدف نهایی گره‌ها در مساله مخابراتی چیست؟ امکانات مخابراتی معمولاً شامل یک کانال مخابراتی است. در ادامه این بخش تمرکز ما بر روی این قسمت از مدل سازی خواهد بود.

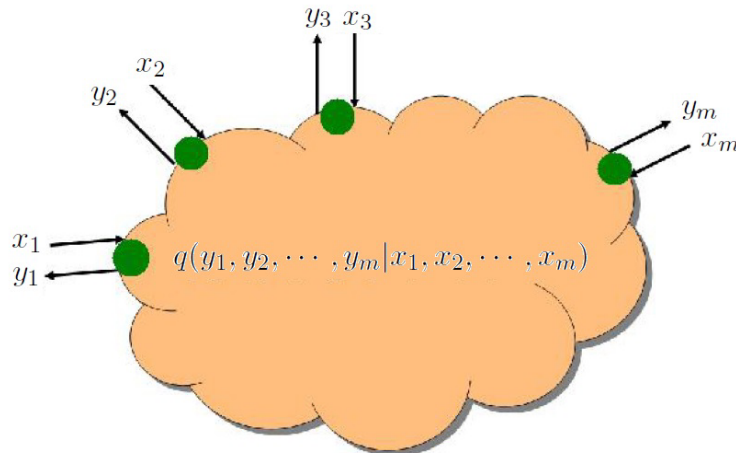
در نمودار شکل زیر سه گره را مشاهده میکنیم که میان آنها سه لینک بدون نویز با نرخ محدود وجود دارد.



ساختار اتصال گره ها به همدیگر میتواند پیچیده تر باشد:



دو ساختاری که در شکل های بالا دیدیم مربوط به مخابرات سیمی بودند. در مخابرات بی سیم، هر آنتن فرستنده اطلاعاتش را در کل فضا و در تمامی جهت ها پخش میکند. بنابراین نمیتوان انتشار اطلاعات را محدود به تعدادی لینک کرد که روی هم تداخلی ایجاد نمیکند. یکی از مدل های کلی ای که در نظریه اطلاعات شبکه برای محیط های مخابراتی در نظر گرفته میشود در شکل زیر آمده است. در اینجا فرض شده که m گره وجود دارد و گره i ام در هر لحظه ورودی x_i از الفبای \mathcal{X}_i را بر روی کانال قرار داده و سپس خروجی y_i از الفبای \mathcal{Y}_i را مشاهده میکند. ارتباط میان ورودی های کانال و خروجی های آن توسط یک تابع توزیع شرطی $q(y_1, y_2, \dots, y_m | x_1, x_2, \dots, x_m)$ مشخص میشود.



مثال ۱ اگر ورودی و خروجی هر گره دودویی باشد، این محدودیت را میتوان با مشخص کردن الفبای ورودی و خروجی کانال بشکل زیر اعمال کرد:

$$\mathcal{X}_i = \mathcal{Y}_i = \{0, 1\}.$$

اگر گره i ام تنها ورودی به کانال داشته باشد و خروجی ای نگیرد، میتوان فرض کرد که خروجی آن همواره یک عدد ثابت مشخص است، یعنی

$$|\mathcal{Y}_i| = 1.$$

روش دیگر انجام آن فرض کردن این شرط است که خروجی i ام هیچ ربطی به ورودی و خروجی های دیگر ندارد:

$$q(y_1, y_2, \dots, y_m | x_1, x_2, \dots, x_m) = q(y_i)q(y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_m | x_1, x_2, \dots, x_m).$$

اگر گره i ام تنها خروجی از کانال داشته باشد و ورودی ای نداشته باشد، میتوان فرض کرد که

$$|\mathcal{X}_i| = 1.$$

روش دیگر انجام آن فرض کردن این شرط است که ورودی i ام هیچ تاثیری روی خروجی ها ندارد:

$$q(y_1, y_2, \dots, y_m | x_1, x_2, \dots, x_m) = q(y_1, y_2, \dots, y_m | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_m).$$

تمرین ۲ اگر بخواهیم شبکه سیمی با سه گره (که در بالا آمد) را با استفاده از $q(y_1, y_2, y_3 | x_1, x_2, x_3)$ مدل کنیم، یک انتخاب برای الفبای ورودی و خروجی و مشخصه کانال بیابید.

۲ چهار کانال مهم

چهار کانال مهم در نظریه اطلاعات شبکه ها عبارتند از

۱. **کانال دسترسی چندگانه:**^۱ چندین فرستنده برای ارتباط با گیرنده از یک کانال استفاده می کنند. یک مثال از این کانال، کانال از تلفن همراه کاربران به ایستگاه مرکزی در یک شبکه ی سلولی (uplink) است.

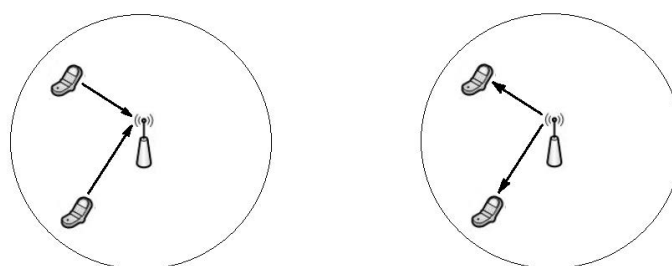
۲. **کانال پخش:**^۲ که در آن یک فرستنده برای ارتباط با چندین گیرنده از یک کانال استفاده می کند. یک مثال ارتباط میان ایستگاه مرکزی با کاربران تلفن همراه در یک شبکه ی سلولی (downlink) است.

۳. **کانال تداخل:**^۳ که در آن چندین فرستنده و گیرنده از طریق کانال مشترک با همدیگر در ارتباط هستند. یک مثال از این کانال ارتباط بی سیم چندین جفت کاربر و ایستگاه های مربوطه شان در یک شبکه ی سلولی (inter-cell interference) است.

^۱Multiple Access Channel (MAC)

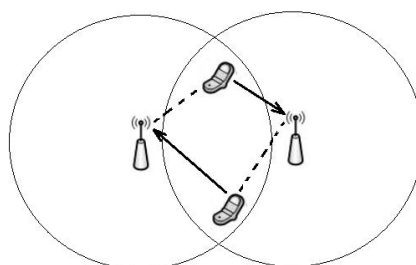
^۲Broadcast channel

^۳Interference Channel



کانال دسترسی چندگانه

کانال پخش



کانال تداخل

۴. کانال رله: ۴ که در آن یک فرستنده از طریق یک گره واسط اطلاعاتش را به یک گیرنده منتقل میکند.

۳ ناحیه‌ی ظرفیت

مساله ای را در نظر بگیرید که گره های شبکه کاربرانی هستند که هدفشان انتقال پیام هایی به کاربران دیگر شبکه است. بسته به تعداد کاربرها و اینکه چه کاربرانی برای چه کاربرانی پیام داشته باشند، برداری از نرخ های مربوط به k پیام قابل تصور است. معمولا چون تمامی کاربران از یک محیط مشترک برای انتقال پیام استفاده میکنند، میان این نرخ ها تنش وجود دارد، به این معنی که زیاد کردن یکی منجر به کم کردن دیگری میشود. به مجموعه نرخ های قابل حصول همزمان (زیرمجموعه ای از فضای k بعدی) اصطلاحا ناحیه‌ی ظرفیت میگویند. ناحیه‌ی ظرفیت بسیاری از کانال های مورد بررسی در نظریه اطلاعات شبکه ها همچنان حل نشده باقی مانده است. به عنوان مثال در میان چهار کانال بالا تنها ناحیه‌ی ظرفیت کانال دسترسی چندگانه تعیین شده است. یافتن ناحیه‌ی ظرفیت سایر کانال ها همچنان حل نشده باقی مانده است. در صورتی که هدف گره های یک شبکه محاسبه توابعی از مشاهدات دیگر گره ها باشد، آنوقت مفهومی بنام ظرفیت محاسباتی^۵ تعریف میشود. اگر هدف ایجاد هماهنگی میان گره ها برای انجام تصمیم گیری های متناسب باشد، مفهومی بنام ظرفیت هماهنگی^۶ مطرح میشود.

^۴Relay Channel

^۵Computational Capacity

^۶Coordination Capacity